

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی عمران
رشته مهندسی عمران گرایش مهندسی و مدیریت منابع آب

پایان نامه کارشناسی ارشد

**استفاده از روش موجک و فیلتر گوسین برای برآورد تغییرات سالانه‌ی آب‌های
زیرزمینی کشور ایران با استفاده از ماهواره‌های ثقل‌سنجی GRACE**

نگارنده: امین کاظمی

استاد راهنما
دکتر سعید گلیان

دی ۱۳۹۶

شماره: ۲۱۱
تاریخ: ۱۵، ۱۱، ۹۷

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای امین کاظمی با شماره دانشجویی ۹۴۱۴۳۷۴ رشته مهندسی عمران گرایش مهندسی و مدیریت منابع آب تحت عنوان استفاده از روش موجک و فیلتر گوسین برای برآورد تغییرات سالانه‌ی آب‌های زیرزمینی کشور ایران با استفاده از ماهواره‌های نقل‌سنجی GRACE که در تاریخ ۱۳۹۶/۱۰/۱۶ با حضور هیات محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

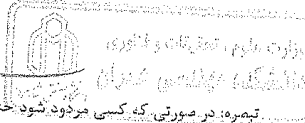
قبول (با درجه: خوب) مردود

نوع تحقیق: نظری عملی

اعضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیات داوران
	استادیار	دکتر سعید گلپان	۱- استاد راهنمای اول
		-	۲- استاد راهنمای دوم
		-	۳- استاد مشاور
	استادیار	دکتر مهدی عجمی	۴- نماینده تحصیلات تکمیلی
	استادیار	دکتر مهدی گلی	۵- استاد ممتحن اول
	استادیار	دکتر رمضان واقعی	۶- استاد ممتحن دوم

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر احمد احمدی

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:



تصویر: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می‌تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

تقدیم

به پاس گرمای امیدبخش وجودشان و به پاس قلب‌های بزرگشان که فریادرس است و به پاس محبت‌های بی‌دریغشان که هرگز فروکش نمی‌کند این مجموعه را محضر ارزشمند پدر و مادر عزیزم، به‌خاطر همه تلاش‌های محبت‌آمیزی که در دوران مختلف زندگی‌ام انجام داده‌اند و سهم بسزایی در پیشرفت‌های زندگی‌ام داشته‌اند و با مهربانی چگونه زیستن را به من آموختند تقدیم می‌کنم.

پروردگارا حُسن عاقبت، سعادت و سلامت را برای آنان مقدر فرما.

تقدیر و تشکر

بدینوسیله مراتب قدردانی و تشکر خود را از جناب آقای دکتر گلین اعلام می‌دارم که با پیشنهاد موضوع این پایان‌نامه و راهنمایی‌های ارزشمندشان مرا در به انجام رساندن این پایان‌نامه هدایت نمودند و امیدوارم در سایه الطاف الهی، همیشه سلامت و پیروز باشند.

در پایان وظیفه خود می‌دانم از تمامی اساتید گرانقدری که در دوره‌ی کارشناسی ارشد توفیق درک محضرشان را داشته‌ام، کمال قدردانی را داشته باشم.

امین کاظمی

دی ۱۳۹۶

چکیده:

با مقایسه کشورهای واقع در مناطق معتدل با کشور ایران که دارای شرایط اقلیمی از نوع خشک و نیمه خشک می باشد، کمبود آب یکی از عوامل مهم بازدارنده در توسعه کشور است. در نتیجه لزوم بهره برداری مناسب از منابع آب موجود بخصوص منابع آب زیرزمینی که همواره یکی از مهم ترین و مطمئن ترین منابع آبی در مناطق خشک و نیمه خشک محسوب می شود و استحصال آب از این مناطق نسبت به اقلیم های دیگر حائز اهمیت ویژه ای است، را دو چندان می کند. هدف از انجام این پایان نامه، برآورد تغییرات سالیانه ی سطح آب های زیرزمینی در کشور ایران با استفاده از داده های ماهواره های ثقل سنجی GRACE و سه خروجی مدل GLDAS یعنی آب معادل برف، رطوبت خاک و آب ذخیره شده در تاج پوشش گیاهان، طی ماه آگوست سال ۲۰۰۲ تا ماه آگوست سال ۲۰۱۶ میلادی است. برای از بین بردن خطای موجود در داده های ماهواره ی GRACE، از روش موجک و فیلتر گوسین استفاده شد و در نهایت اعتبار سنجی تغییرات سطح آب زیرزمینی، توسط داده های چاه های مشاهداتی در سطح استان های خراسان رضوی و جنوبی انجام شد. نتایج کاهش سطح آب های زیرزمینی در کشور طی سال ۲۰۰۲ تا سال ۲۰۱۶ میلادی و همچنین دقت بهتر روش موجک در مقایسه با فیلتر گوسین را نشان دادند.

کلمات کلیدی: ماهواره ی ثقل سنجی GRACE، مدل هیدرولوژی GLDAS، آب های زیرزمینی، روش

موجک، فیلتر گوسین

فهرست مطالب

۱- فصل اول (کلیات)	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۱-۲- ضرورت تحقیق	۶
۱-۳- اهداف تحقیق	۱۰
۱-۴- فرضیات تحقیق	۱۰
۱-۵- ساختار پایان نامه	۱۱
۲- فصل دوم (مروری بر تحقیقات پیشین)	۱۲
۱-۲- مقدمه	۱۳
۲-۲- پیشینه‌ی خارجی تحقیق	۱۳
۳-۲- پیشینه‌ی داخلی تحقیق	۱۶
۳- فصل سوم (مواد و روش‌ها)	۲۱
۱-۳- مقدمه	۲۲
۲-۳- زمین و میدان ثقل آن	۲۲
۱-۲-۳- میدان گرانش استاتیک	۲۳
۲-۲-۳- میدان گرانش دینامیک	۲۳
۳-۳- ماهواره‌های ثقل‌سنجی	۲۳
۱-۳-۳- مقدمه	۲۳
۲-۳-۳- ماهواره‌ی ثقل‌سنجی GRACE	۲۴
۱-۲-۳-۳- مشخصات اصلی ماهواره‌ی ثقل‌سنجی GRACE	۲۵

- ۲۵ ۳-۳-۲-۲-۲- نمونه‌ای از ابزارهای بکاررفته در ماهواره‌ی ثقل‌سنجی GRACE
- ۲۷ ۳-۳-۲-۳- ساختار مأموریت ماهواره‌ی ثقل‌سنجی GRACE
- ۲۸ ۳-۳-۲-۴- اهداف ماهواره‌ی ثقل‌سنجی GRACE
- ۲۹ ۳-۳-۲-۵- داده‌های ماهواره‌ی ثقل‌سنجی GRACE
- ۳۱ ۳-۳-۳- ضرایب هارمونیک کروی
- ۳۱ ۳-۳-۱- مقدمه
- ۳۲ ۳-۳-۲- ضریب درجه صفر هارمونیک کروی
- ۳۲ ۳-۳-۳- ضرایب درجه یک هارمونیک کروی
- ۳۳ ۳-۳-۴- ضریب درجه دو هارمونیک کروی
- ۳۴ ۳-۴- روش از بین بردن اثرات هیدرولوژی
- ۳۴ ۳-۴-۱- مقدمه
- ۳۴ ۳-۴-۲- مدل جهانی هیدرولوژی GLDAS
- ۳۷ ۳-۵- تغییرات جرم و رابطه‌ی آن با ضرایب هارمونیک
- ۳۷ ۳-۵-۱- مقدمه
- ۳۷ ۳-۵-۲- تعیین تغییرات جرم با استفاده از ضرایب هارمونیک
- ۳۸ ۳-۵-۲-۱- اعداد لاو
- ۳۹ ۳-۵-۲-۲- توابع وابسته لژاندر
- ۴۰ ۳-۶- فیلترینگ
- ۴۰ ۳-۶-۱- مقدمه
- ۴۱ ۳-۶-۲- فیلتر گوسین

۴۲	..... ۷-۳-۲ روش موجک
۴۲	..... ۱-۷-۳ مقدمه
۴۳	..... ۲-۷-۳ استفاده از موجک به عنوان یک فیلتر محلی
۴۳	..... ۳-۷-۳ تابع مقیاس
۴۵	..... ۸-۳ روش انجام کار
۴۹	..... ۴- فصل چهارم (نتایج و بحث)
۵۰	..... ۱-۴ مقدمه
۵۰	..... ۲-۴ محدوده‌ی مطالعاتی
۵۱	..... ۳-۴ نتایج
۵۲	..... ۱-۳-۴ نتایج تغییرات سالانه‌ی آب‌های زیرزمینی به کمک فیلتر گوسین
۵۴	..... ۲-۳-۴ نتایج تغییرات سالانه‌ی آب‌های زیرزمینی به کمک موجک Db4
۵۷	..... ۳-۳-۴ نتایج تغییرات سالانه‌ی آب‌های زیرزمینی به کمک موجک CUP
۶۰	..... ۴-۴ تفسیر نتایج سالانه‌ی تغییرات آب‌های زیرزمینی در کشور ایران
۶۵	..... ۵-۴ صحت‌سنجی نتایج
۶۹	..... ۵- فصل پنجم (جمع‌بندی و پیشنهادات)
۷۰	..... ۱-۵ جمع‌بندی
۷۱	..... ۲-۵ پیشنهادات برای کارهای آتی
۷۳	..... ۶- فصل ششم (مراجع)

فهرست اشکال

- شکل ۳-۱: ماهواره‌ی ثقل‌سنجی GRACE ۲۵
- شکل ۳-۲: نمای بالایی ماهواره‌ی ثقل‌سنجی GRACE ۲۷
- شکل ۳-۳: نمای داخلی ماهواره‌ی ثقل‌سنجی GRACE ۲۷
- شکل ۳-۴: ساختار مأموریت ماهواره‌ی ثقل‌سنجی GRACE ۲۸
- شکل ۳-۵: نحوه‌ی شکل‌گیری مدارهای زوج ماهواره ثقل‌سنجی GRACE در دوره یک روزه ۲۹
- شکل ۳-۶: روند تغییرات جرم برحسب میلی‌متر در سال با استفاده از داده‌های سطح ۲ نسخه‌ی ۵ مرکز CSR و شعاع میانگین‌گیری ۳۰۰ کیلومتر ۳۰
- شکل ۳-۷: روند تغییرات جرم برحسب میلی‌متر در سال با استفاده از داده‌های سطح ۲ نسخه‌ی ۵ مرکز CSR و شعاع میانگین‌گیری ۳۵۰ کیلومتر ۳۱
- شکل ۳-۸: روند تغییرات جرم برحسب میلی‌متر در سال با استفاده از داده‌های سطح ۲ نسخه‌ی ۵ مرکز CSR و شعاع میانگین‌گیری ۵۰۰ کیلومتر ۳۱
- شکل ۳-۹: نمونه‌ای از داده‌های ماهواره‌ی ثقل‌سنجی GRACE ۳۲
- شکل ۳-۱۰: ایجاد نوارهای شمالی-جنوبی (بدون اعمال فیلتر مناسب) ۴۰
- شکل ۴-۱-الف: سال ۲۰۰۲-۲۰۰۳ ۵۲
- شکل ۴-۱-ب: سال ۲۰۰۳-۲۰۰۴ ۵۲
- شکل ۴-۱-پ: سال ۲۰۰۴-۲۰۰۵ ۵۲
- شکل ۴-۱-ت: سال ۲۰۰۵-۲۰۰۶ ۵۲
- شکل ۴-۱-ث: سال ۲۰۰۶-۲۰۰۷ ۵۳
- شکل ۴-۱-ج: سال ۲۰۰۷-۲۰۰۸ ۵۳

- شکل ۱-۴-ج: سال ۲۰۰۸-۲۰۰۹ ۵۳
- شکل ۱-۴-ح: سال ۲۰۰۹-۲۰۱۰ ۵۳
- شکل ۱-۴-خ: سال ۲۰۱۰-۲۰۱۱ ۵۳
- شکل ۱-۴-د: سال ۲۰۱۱-۲۰۱۲ ۵۳
- شکل ۱-۴-ذ: سال ۲۰۱۲-۲۰۱۳ ۵۴
- شکل ۱-۴-ر: سال ۲۰۱۳-۲۰۱۴ ۵۴
- شکل ۱-۴-ز: سال ۲۰۱۴-۲۰۱۵ ۵۴
- شکل ۱-۴-ژ: سال ۲۰۱۵-۲۰۱۶ ۵۴
- شکل ۲-۴-الف: سال ۲۰۰۲-۲۰۰۳ ۵۵
- شکل ۲-۴-ب: سال ۲۰۰۳-۲۰۰۴ ۵۵
- شکل ۲-۴-پ: سال ۲۰۰۴-۲۰۰۵ ۵۵
- شکل ۲-۴-ت: سال ۲۰۰۵-۲۰۰۶ ۵۵
- شکل ۲-۴-ث: سال ۲۰۰۶-۲۰۰۷ ۵۵
- شکل ۲-۴-ج: سال ۲۰۰۷-۲۰۰۸ ۵۵
- شکل ۲-۴-چ: سال ۲۰۰۸-۲۰۰۹ ۵۶
- شکل ۲-۴-ح: سال ۲۰۰۹-۲۰۱۰ ۵۶
- شکل ۲-۴-خ: سال ۲۰۱۰-۲۰۱۱ ۵۶
- شکل ۲-۴-د: سال ۲۰۱۱-۲۰۱۲ ۵۶
- شکل ۲-۴-ذ: سال ۲۰۱۲-۲۰۱۳ ۵۶
- شکل ۲-۴-ر: سال ۲۰۱۳-۲۰۱۴ ۵۶

- شکل ۴-۲-ز: سال ۲۰۱۴-۲۰۱۵..... ۵۷
- شکل ۴-۲-ژ: سال ۲۰۱۵-۲۰۱۶..... ۵۷
- شکل ۴-۳-الف: سال ۲۰۰۲-۲۰۰۳..... ۵۷
- شکل ۴-۳-ب: سال ۲۰۰۳-۲۰۰۴..... ۵۷
- شکل ۴-۳-پ: سال ۲۰۰۴-۲۰۰۵..... ۵۸
- شکل ۴-۳-ت: سال ۲۰۰۵-۲۰۰۶..... ۵۸
- شکل ۴-۳-ث: سال ۲۰۰۶-۲۰۰۷..... ۵۸
- شکل ۴-۳-ج: سال ۲۰۰۷-۲۰۰۸..... ۵۸
- شکل ۴-۳-چ: سال ۲۰۰۸-۲۰۰۹..... ۵۸
- شکل ۴-۳-ح: سال ۲۰۰۹-۲۰۱۰..... ۵۸
- شکل ۴-۳-خ: سال ۲۰۱۰-۲۰۱۱..... ۵۹
- شکل ۴-۳-د: سال ۲۰۱۱-۲۰۱۲..... ۵۹
- شکل ۴-۳-ذ: سال ۲۰۱۲-۲۰۱۳..... ۵۹
- شکل ۴-۳-ر: سال ۲۰۱۳-۲۰۱۴..... ۵۹
- شکل ۴-۳-ز: سال ۲۰۱۴-۲۰۱۵..... ۵۹
- شکل ۴-۳-ژ: سال ۲۰۱۵-۲۰۱۶..... ۵۹
- شکل ۴-۴: تغییرات آب‌های زیرزمینی به کمک فیلتر گوسین طی سال ۲۰۱۵-۲۰۱۶..... ۶۰
- شکل ۴-۵: تغییرات آب‌های زیرزمینی به کمک موجک Db4 طی سال ۲۰۰۸-۲۰۰۹..... ۶۱
- شکل ۴-۶: تغییرات آب‌های زیرزمینی به کمک موجک CUP طی سال ۲۰۰۲-۲۰۰۳..... ۶۲
- شکل ۴-۷: میانگین کل تغییرات سالیانه‌ی آب‌های زیرزمینی در کل ایران به کمک فیلتر گوسین.....

- ۶۲
- شکل ۴-۸: میانگین کل تغییرات سالیانه‌ی آب‌های زیرزمینی در کل ایران به کمک موجک Db4..... ۶۳
- شکل ۴-۹: میانگین کل تغییرات سالیانه‌ی آب‌های زیرزمینی در کل ایران به کمک موجک CUP..... ۶۳
- شکل ۴-۱۰: سری‌زمانی تغییرات آب‌های زیرزمینی با انتخاب سال ۲۰۰۲ به‌عنوان مرجع-فیلتر..... ۶۴
- شکل ۴-۱۱: سری‌زمانی تغییرات آب‌های زیرزمینی با انتخاب سال ۲۰۰۲ به‌عنوان مرجع-موجک Db4..... ۶۴
- شکل ۴-۱۲: سری‌زمانی تغییرات آب‌های زیرزمینی با انتخاب سال ۲۰۰۲ به‌عنوان سال مرجع-موجک CUP..... ۶۴
- شکل ۴-۱۳: مدل رگرسیون برای استان خراسان رضوی- با استفاده از فیلتر..... ۶۶
- شکل ۴-۱۴: مدل رگرسیون برای استان خراسان جنوبی- با استفاده از فیلتر..... ۶۶
- شکل ۴-۱۵: مدل رگرسیون برای استان خراسان رضوی- با استفاده از موجک Db4..... ۶۶
- شکل ۴-۱۶: مدل رگرسیون برای استان خراسان جنوبی- با استفاده از موجک Db4..... ۶۷
- شکل ۴-۱۷: مدل رگرسیون برای استان خراسان رضوی- با استفاده از موجک CUP..... ۶۷
- شکل ۴-۱۸: مدل رگرسیون برای استان خراسان جنوبی- با استفاده از موجک CUP..... ۶۷
- شکل ۴-۱۹: مقایسه موجک CUP، Db4 و فیلترگوسین با چاه‌های پیژومتری به صورت سری زمانی برای خراسان رضوی ۶۸
- شکل ۴-۲۰: مقایسه موجک CUP، Db4 و فیلترگوسین با چاه‌های پیژومتری به صورت سری زمانی برای خراسان جنوبی ۶۸

فهرست جداول

جدول ۳-۱: نمونه‌ای از پارامترهای خروجی مدل GLDAS ۳۶

جدول ۳-۲: اعداد لاو ۳۹

جدول ۴-۱: محدوده‌ی زمانی داده‌های سطح ۲ نسخه‌ی ۵ ماهواره‌ی GRACE برای مرکز پردازش CSR ۴۰

..... ۵۰

۱- فصل اول

کلیات

۱-۱- مقدمه

آب به عنوان منبع حیات یکی از مهم‌ترین عوامل در رشد و پیشرفت جوامع بشری است و رسیدن به توسعه پایدار در عرصه‌های کشاورزی، اقتصادی و اجتماعی کشورها در سایه وجود منابع آب با کیفیت خوب حاصل می‌شود. ایران با متوسط ریزش‌های آسمانی ۲۴۰ میلی‌متر در سال، در زمره مناطق خشک جهان طبقه‌بندی می‌شود و حجم منابع آب تجدیدشونده کشور به حدود ۱۳۰ میلیارد مترمکعب در سال می‌رسد [۱].

با مقایسه کشورهای واقع در مناطق معتدل با کشور ایران که دارای شرایط اقلیمی از نوع خشک و نیمه‌خشک می‌باشد، کمبود آب یکی از عوامل مهم بازدارنده در توسعه کشور است، لذا مشکل کمبود بارش از یک طرف و توزیع نامناسب زمانی و مکانی بارش از طرف دیگر، لزوم بهره‌برداری مناسب از منابع آب موجود در سراسر کشور را دو چندان می‌کند.

امروزه پیشرفت ملتهای ساکن در مناطق با اقلیم خشک، که در آن تولید غذا به‌شدت توسط مقدار و توزیع زمانی بارندگی کنترل می‌شود، به میزان تلاش این ملتها در زمینه تامین و مهار منابع محدود آب بستگی دارد [۲].

همچنین آب به عنوان یک منبع طبیعی و از جمله ارزش‌های جغرافیایی بسیار مهم در سراسر جهان است که به دلیل چهار ویژگی اساسی ((کمیاب بودن))، ((توزیع ناهمگون))، ((غیر قابل جایگزین بودن)) و ((ماده رقابتی بودن)) در بین گروه‌های انسانی جوامع و کشور همواره رقابت‌آفرین و تنش‌زا بوده است. در این ارتباط واژه هیدروپلیتیک معنا و مفهوم پیدا می‌کند که به بررسی ابعاد مکانی و فضایی آب و سیاست در مقیاس‌های جغرافیایی مختلف و برهم‌کنش‌های میان آن دو می‌پردازد [۳].

با گسترش پدیده‌ی خطرناک کم‌آبی، اکنون بیش از ۲۶ کشور با بیش از ۳۰۰ میلیون نفر جمعیت با بحران کمبود آب مواجه‌اند. در صورت ادامه روند موجود تا سال ۲۰۵۰ میلادی این رقم به ۶۶ کشور با

جمعیتی حدود دو سوم کل جمعیت دنیا، خواهد رسید. طبق گزارش‌های سازمان ملل در نیم قرن اخیر، بیش از ۱۸۳۰ مورد، مناقشه در زمینه آب در جهان رخ داده که ۳۷ مورد آن سبب بروز جنگ و یا انفجار شده است. برخی ژئوپلیتیسین‌ها، قرن ۲۱ را سده‌ی هیدروپلیتیک می‌دانند و براین باورند که اغلب درگیری‌ها و جنگ‌های منطقه‌ای در جهان به دلیل بحران برآمده از کمبود آب خواهد بود. در واقع واژه هیدروپلیتیک، مطالعه ستیز و همکاری میان ملت‌ها بر سر تقسیم منابع آبی است [۴].

خشکسالی وضعیتی از کمبود بارندگی و افزایش دماست که شامل یک دوره پیوسته و پایدار از (چند ماه تا چندین سال) است که ممکن است در هر وضعیت اقلیمی رخ دهد. در این دوره مقدار آب موجود در منابع آبی منطقه به حد قابل توجهی کاهش می‌یابد، به نحوی که سبب کاهش سطح آب‌های جاری و کمبود رطوبت در خاک می‌شود و یکی از بخش‌های متأثرشده از شرایط بلندمدت خشکسالی منابع آب‌های زیرزمینی است. خشکسالی گرچه زیان‌های اقتصادی، خسارات محیطی و اجتماعی زیادی را باعث می‌شود، ولی نسبت به سایر پدیده‌های هواشناسی کمتر مورد توجه قرار گرفته است، زیرا تعریف و پایش آن امری مشکل است. شناخت خشکسالی به عنوان یک بلیه و ارزیابی اثرات آن بر منابع، بویژه منابع آب ضروری است [۵].

اصطلاح خشکسالی آب‌زیرزمینی، برای توصیف وضعیت مکانی است که سطح منابع آب‌زیرزمینی به عنوان پیامد مستقیم خشکسالی، افت پیدا می‌کند. زمانی که سیستم‌های آب‌زیرزمینی تحت تأثیر خشکسالی واقع می‌شود ابتدا آبیگری، سپس سطح و در نهایت آبدهی سفره آب‌زیرزمینی کاهش پیدا می‌کند. چنین خشکسالی را خشکسالی آب‌زیرزمینی می‌نامند [۶]. کشاورزی به عنوان یکی از بخش‌های مهم اقتصادی هر کشور بشمار می‌رود که در هنگام خشکسالی آسیب می‌بیند. وجود شاخص‌های مناسب و قابل قبول بنحوی که بتوانند خشکسالی را بطور مؤثری مورد ارزیابی و پایش قرار دهند امری ضروری و اساسی است. همچنین وضعیت بهره‌وری آب در ایران کم است و بازده اقتصادی در آب کشاورزی، در ایران

از جمله پایین‌ترین بازدهی‌ها در بین کشورهای منطقه است.

عموماً خاورمیانه با دو خصوصیت کمبود آب و رشد سریع جمعیت شناخته می‌شود و از آن‌جا که آب‌وهوا در بیشتر منطقه خاورمیانه از نوع گرم و خشک است، آب مهم‌ترین فاکتور و از جمله مسائل جدی در این منطقه محسوب می‌شود. خشکسالی اخیر که در سال ۲۰۰۷ اتفاق افتاد نیز فشار بیشتری در محدودیت منابع آب در این منطقه ایجاد کرده است. براساس گزارش بانک جهانی (۲۰۰۷)، حدود نیمی از کشورهای این منطقه بیشترین آب مصرفی را از بارندگی فراهم می‌کنند و ۸۵ درصد این آب برای کشاورزی استفاده می‌شود. بیابان‌زایی که از آن با عنوان کاهش قابلیت بهره‌وری اراضی و ایجاد بیابان‌های جدید تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی مخرب و فرساینده خاک یاد می‌شود، نیز اثرات گسترده‌ای در خاورمیانه، به‌خصوص در کشورهای ایران، عراق، سوریه و اردن دارد [۷].

گزارش از یک وضعیت بحرانی و همچنین نابودی اکوسیستم در این منطقه و مهاجرت صدها کشاورز به مراکز شهرها برای جستجوی کار، خبر می‌دهد. بیابان‌زایی در منطقه خاورمیانه به‌خصوص در ایران، عراق، سوریه و اردن اتفاق افتاده است. بررسی تغییرات مکانی و زمانی سطح آب‌های زیرزمینی می‌تواند برای مدیریت پایدار منابع آب در این منطقه مفید باشد. در این راستا بررسی نوسان‌های سطح آب‌زیرزمینی از جمله مهم‌ترین راهکارهای مدیریتی است که می‌تواند در این مورد مفید و موثر واقع شود. به‌دلیل محدودیت‌های داده‌های هیدرولوژیکی و آماری در این مناطق، نظارت بر سطح آب‌های زیرزمینی با روش‌های مشاهداتی سنتی بسیار سخت و هزینه‌بر است [۸].

منابع آب‌زیرزمینی همواره یکی از مهم‌ترین و مطمئن‌ترین منابع آبی در مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب بوده و استحصال آب از این مناطق نسبت به اقلیم‌های دیگر حائز اهمیت ویژه‌ای است. مدیریت و بهره‌برداری بهینه این منابع بدون شناخت آن‌ها امکان‌پذیر نیست. سطح آب‌زیرزمینی در ایران در اغلب دشت‌های کشت آبی در حدود ۰/۵ تا ۱ متر در سال افت دارد [۹]. در مناطق خشک و

نیمه خشک، آب‌های سطحی جواب‌گوی نیاز بخش‌های مختلف مصرف نبوده و این کمبود معمولاً از طریق آب‌های زیرزمینی جبران می‌گردد. آب‌های زیرزمینی، مخزن‌های آب طبیعی می‌باشند که نیاز به سرمایه‌گذاری ندارند و خود پالایش هستند. تبخیر در آن‌ها صورت نمی‌گیرد، آسیب‌پذیری کمی دارند و منابع مطمئن‌تری نسبت به آب‌های سطحی هستند و امکان استفاده از این آب‌ها در سال‌های خشکسالی وجود دارد. گاهی تأمین این منافع، زیان‌های زیست‌محیطی و کاهش سطح دسترسی به منابع آب زیرزمینی را به دنبال دارد. برای مثال، برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی، باعث پدید آمدن فروچاله‌ها و یا تخریب برخی از زیست‌بوم‌های مناطق خشک و نیمه خشک می‌شود [۱۰].

برای حفظ پایداری در توسعه منابع تجدیدپذیر آب زیرزمینی یک منطقه، کمی نمودن تغییرات مکانی و زمانی این منابع از اهمیت زیادی برخوردار است. برآورد دقیق و قابل اطمینان از سطح ایستابی در آبخوان‌های مورد بهره‌برداری مهم بوده و در صورت اطلاع از نوسانات سطح ایستابی به‌آسانی و با هزینه پایین می‌توان به تغییرات ذخیره آب زیرزمینی دست یافت [۱۱].

در شرایط حاضر از منابع آب زیرزمینی کشور حداکثر استفاده بعمل می‌آید به طوری که به سبب برداشت بی‌رویه از این منابع، سطح آب‌های زیرزمینی در کشور دچار افت شده و مشکلاتی را برای ادامه‌ی حیات کشاورزی و توسعه‌ی اقتصادی کشور فراهم آورده است. در گذشته به دلیل عدم توسعه‌ی تکنولوژی، بهره‌برداری از سفره‌های آب زیرزمینی به صورت محدود انجام می‌گرفت. در بیست سال اخیر روش تخلیه‌ی سفره به تدریج تغییر کرده و استفاده از سیستم‌های برداشت جدید مانند چاه‌های عمیق و نیمه عمیق متداول گردیده است. با استفاده از این چاه‌ها، تخلیه‌ی آب‌های زیرزمینی بدون توجه به میزان تغذیه‌ی آن‌ها افزایش یافته و در نتیجه سطح آب‌های زیرزمینی سیر نزولی داشته است. در حال حاضر سطح آب‌های زیرزمینی در حال افت است و قسمت عمده‌ی آب در دشت‌ها توسط قنوات و یا چاه‌ها تخلیه می‌شود. به منظور کنترل میزان برداشت از آب‌های زیرزمینی می‌بایست بیلان آب زیرزمینی در منطقه

محاسبه گردد تا مقادیر کسری مخازن (آبخوان‌ها) در طی سال‌های آبی مشخص شود، تا سیستم‌های مدیریتی از جمله مدیریت منابع آب‌های زیرزمینی، پیش‌بینی لازم جهت اعمال مدیریت صحیح‌تر برای جلوگیری از بحران در این بخش از منابع آب را صورت دهند [۱۲].

۱-۲- ضرورت تحقیق

منابع آب قابل برداشت جهان، به دو قسمت آب‌های زیرزمینی و آب‌های سطحی تقسیم‌بندی می‌شوند. با در نظر گرفتن ایران با وسعت ۱۶۴۸۱۹۵ کیلومتر مربع و براساس آخرین برآورد مرکز آمار که در مهرماه سال ۱۳۹۵ انجام شد، جمعیت کشور به ۷۹ میلیون و ۹۲۶ هزار و ۲۷۰ نفر رسیده است و همچنین با توجه به افزایش روزافزون جمعیت در ایران، گسترش زمین‌های کشاورزی و محدودیت در منابع آب مخصوصاً در مناطق خشک و نیمه‌خشک، به‌ناچار، استفاده از منابع آب‌های زیرزمینی افزایش یافته است.

منابع آب شیرین کره‌زمین بخش کوچکی از کل ذخایر آب سطح کره‌زمین را تشکیل می‌دهد (حدود ۲/۵ درصد) در این میان، بدون یخچال‌های قطبی، تنها حدود ۰/۸ درصد از کل منابع آب موجود در کره‌زمین، شیرین و قابل استفاده است که عمده آن‌را منابع آب‌زیرزمینی تشکیل می‌دهد. آب‌زیرزمینی تجدیدپذیر حدود ۱۰۰۰۰ کیلومتر مکعب در سال است (نزدیک به یک چهارم کل آب‌های تجدیدشونده) که ۲۰ درصد آن با منشأ نفوذ مستقیم بارش و ۸۰ درصد حاصل نفوذ جریانات آب‌سطحی است. این منابع که بخشی از چرخه آب در زمان حاضر را تشکیل می‌دهد نسبت به حجم آب‌زیرزمینی که در یک دوره طولانی در اعماق چند هزار متری سطح زمین ذخیره شده‌اند، بسیار اندک است (یعنی ۱ درصد کل ذخایر آب‌زیرزمینی). بنابراین، فقط بخش بسیار کوچکی از حجم کل ذخایر آب‌های زیرزمینی در هر سال تجدید می‌شود. این موضوع سراسرترین پاسخی است که به معمای منابع آب‌زیرزمینی ((عظیم اما محدود))، می‌توان داد [۱۳].

تغییرات آب و هوا، استخراج آب از چاه‌ها و بروز خشکسالی‌های گسترده و متوالی باعث می‌شود که سطوح آب‌های زیرزمینی در طول سال تغییر کند، که تداوم این امر روند کاهش ذخایر و تخریب کمی و کیفی آب‌های زیرزمینی را سبب می‌شود. تخمین تغییرات آب‌های زیرزمینی در مناطق وسیع حتی به کمک مدل‌های ریاضی پیشرفته نیز به‌سختی قابل محاسبه می‌باشد [۱۴]. از آنجا که آب‌های زیرزمینی یکی از مهم‌ترین و ارزان‌ترین منابع آب به‌شمار می‌روند می‌توانند در توسعه پایدار کشورها نقش بسزایی داشته باشند، از این رو عدم شناخت درست و بهره‌برداری بی‌رویه از آن‌ها خسارات جبران‌ناپذیر زیادی از جمله افت شدید سطح ایستابی و افزایش هزینه‌های استحصال، کاهش دبی چاه‌ها و قنوت، شور شدن تدریجی آب‌زیرزمینی و پیشروی جبهه آب شور به طرف آب شیرین، فشرده شدن خاک و عدم نفوذپذیری در موقع بارندگی می‌شود. این پدیده علاوه بر ناپایداری زمین، موجب غیرقابل استفاده شدن آبخوان‌ها در بارندگی‌های بعدی شده و برای همیشه منطقه را از بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی بی‌نصیب می‌سازد. بدین منظور برای آگاهی از وضعیت منابع آب‌های زیرزمینی و مدیریت بهینه آن لازم است بررسی دقیقی از نوسانات سطح آب‌های زیرزمینی انجام شود [۱۵].

از آنجا که آب‌زیرزمینی یک منبع بسیار مهم تأمین آب شیرین مورد نیاز جهت مصارف کشاورزی و شرب و صنعت در تمام جهان می‌باشد در مناطق خشک و نیمه‌خشک که محدودیت‌هایی برای منابع دیگر وجود دارد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در چنین مناطقی به علت اینکه بارندگی در یک دوره کوتاه مدت رخ می‌دهد و میزان تبخیر و تعرق بالاست، منابع آب‌های سطحی منبع قابل اعتمادی برای تأمین آب نمی‌باشند. از آنجا که بخش‌های عمده‌ای از کشور ما نیز دارای چنین اقلیمی می‌باشد، هرگونه مطالعه و تحقیق در زمینه منابع آب‌زیرزمینی در ایران مفید و ارزشمند خواهد بود [۱۶].

در حال حاضر آب‌های زیرزمینی بیش از ۵۵ درصد از کل تقاضای آب در ایران را تأمین می‌کنند. و تقریباً ۵۰ درصد دشت‌ها در ایران در شرایط بحرانی قرار دارند. این وضعیت منجر به تخریب آب‌های

زیرزمینی و صدمه برگشت‌ناپذیر به اکوسیستم‌های آبی و پیکره آب‌های سطحی می‌شود [۱۷].

از طرفی آب‌زیرزمینی معمولاً به عنوان منبع نامرئی شناخته می‌شود و دانش ما از منابع آب‌زیرزمینی به دلیل عدم شناخت صحیح، نسبت به سایر منابع سطحی بسیار کمتر است. شبکه‌های ارزیابی زیرزمینی نیز محدودتر و دسترسی به داده‌های مطمئن نیز حتی وقتی سیستم‌های مشاهداتی موجود است، بسیار کمتر است. مدیریت و برنامه‌ریزی صحیح منابع آب‌های زیرزمینی به میزان آگاهی از روند تغییرات مکانی و زمانی این منابع باارزش وابسته است. بنابراین، ضرورت دستیابی به شبکه‌ای از داده‌های منابع آب‌زیرزمینی در مناطق بزرگ مقیاس انکارناپذیر است. دلایل ذکر شده، انگیزه‌های فراوانی در استفاده از فناوری سنجش از دور برای شناسایی مخازن آب‌زیرزمینی ایجاد کرده است.

از دیرباز تغییرات ذخیره آب در یک حوضه آبریز، بررسی سطح سفره‌های آب‌زیرزمینی و آگاهی از روند تغییرات آن توسط احداث چاه‌های پیژومتری در مقیاس‌های نقطه‌ای و محلی (آبخوان‌ها) صورت می‌گیرد ولی نشان‌دادن تغییرات کلی آب‌ها در یک منطقه به وسعت مرزهای یک کشور تا یک قاره توسط روش‌های مرسوم مشکل‌ساز می‌باشد و نتایج درستی را ارائه نمی‌کند. از مشکلات موجود می‌توان برای مثال از ناسازگاری داده‌ها، نداشتن رزولوشن مکانی خوب، نقطه‌ای بودن اندازه‌گیری‌ها، خطاهای انسانی و وسایل به‌کاررفته و هزینه بالا نام برد که در این روش چندان مقرون به‌صرفه نیست. البته در سایر مطالعات هیدرولوژی نظیر رطوبت خاک، نمایش عمق برف، رواناب و دیگر جزئیات چرخه آب قابل اندازه‌گیری و سنجش با روش‌های مرسوم می‌باشد. برآورد توزیع مکانی سطح ایستابی، در طیف گسترده‌ای از مسائل مانند سدهای زیرزمینی، طرح‌های محیط‌زیست، طرح‌های آبخیزداری و بسیاری از بحث‌های منابع آب کاربرد دارد. تغییرات زیاد سطح ایستابی در نقاط مختلف سفره، کمبود چاه‌های مشاهداتی و پیچیدگی ارتباط سطح ایستابی با دیگر پارامترها، اهمیت توسعه روش‌های کارآمد را در برآورد توزیع مکانی سطح ایستابی دو چندان می‌نماید و پیش‌بینی زمانی و مکانی تراز آب‌های زیرزمینی یکی از مسائل مهم در

مطالعات هیدروژئولوژیکی به‌شمار می‌رود. با رشد تکنولوژی اندازه‌گیری این تغییرات به کمک داده‌های سنجش از دوری صورت گرفت، داده‌های سنجش از دور به دلیل وسعت و یکپارچگی، تنوع طیفی و تهیه پوشش‌های تکراری در مقایسه با سایر روش‌های جمع‌آوری اطلاعات از قابلیت ویژه‌ای برخوردار است. امکان رقومی کردن داده‌ها باعث شده است که سیستم‌های کامپیوتری بتوانند از این داده‌ها به طور مستقیم استفاده کنند. راحتی تهیه داده‌ها، دسترسی سریع به نقاط دورافتاده و صعب‌العبور، دقت بالای آن‌ها و مشاهدات تقریباً همگن از مزایای استفاده از این روش است.

در دهه ۱۹۷۰ میلادی دانشمندان شروع به تمرکز بر روی تست استفاده از روش‌های ماهواره‌ای در نمایش پدیده‌های هیدرولوژیکی کردند. آب‌های زیرزمینی یکی از آخرین پدیده‌های هیدرولوژیکی می‌باشد که از روش‌های ماهواره‌ای در تعیین آن استفاده شده است. تغییر در ذخیره زمینی آب، عامل مهمی در بررسی اکوسیستم یک منطقه می‌باشد و تحقیقات علمی زیادی بر روی قابلیت‌های روش‌های ماهواره‌ای در تعیین این تغییرات صورت گرفت، در این روش علی‌رغم اینکه رزولوشن مکانی نسبتاً خوب می‌باشد ولی تنها می‌توانند تا عمق چند سانتی‌متری زمین را مورد بررسی قرار دهند. پروژه ماهواره‌ی بازیابی گرانش و آزمایش اقلیمی، یا به اختصار ماهواره‌ی ثقل‌سنجی GRACE^۱، اولین پروژه ماهواره‌ی می‌باشد که نتایج حاصل از آن به‌صورت مستقیم برای تعیین تغییرات آب‌های زیرزمینی در هر شرایط زمینی از نظر شکل و جنس قابل استفاده می‌باشد و در حال حاضر تنها ماهواره‌ی سنجش از دوری است که توانایی نظارت بر تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی را دارد. پروژه ماهواره‌ی GRACE، علاوه بر پوشش مکانی و زمانی مناسب و دقت قابل قبول در کنار سایر مدل‌های هیدرولوژیکی می‌تواند به عنوان ابزاری جایگزین به‌منظور مطالعه تغییرات منابع آب‌زیرزمینی استفاده شود [۱۸].

پروژه ماهواره ثقل‌سنجی GRACE، یک پروژه بسیار موفق در زمینه‌ی تعیین میدان ثقل زمین با

^۱ Gravity Recovery And Climate Experiment

دقتی دقیق‌تر از پروژه‌های پیش از خود می‌باشد [۱۹]. این ماهواره می‌تواند میدان ثقل زمین را در بازه‌های زمانی مشخص و مقیاس‌های مکانی چندصد کیلومتر و بیشتر تعیین کند و با بررسی این میدان‌ها به تغییرات جرم پی‌برد و از روی آن، به بررسی سایر پدیده‌ها مانند تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی پرداخت.

۳-۱- اهداف تحقیق

هدف از این تحقیق، برآورد تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی در کشور ایران با استفاده از داده‌های ماهواره‌های ثقل‌سنجی GRACE، مدل هیدرولوژی با نام سیستم تحلیل و شبیه‌سازی داده‌های زمینی در مقیاس جهانی (GLDAS)^۱ و حذف نویز از روی داده‌های ماهواره‌ی ثقل‌سنجی GRACE به کمک روش موجک^۲ و فیلتر گوسین^۳ است و در نهایت اعتبار سنجی تغییرات سطح آب‌زیرزمینی، توسط داده‌های چاه‌های مشاهداتی در سطح استان‌های خراسان رضوی و جنوبی است.

۴-۱- فرضیات تحقیق

یکی از محدودیت‌های اصلی در انجام این تحقیق، دسترسی به داده‌هاست. این پایان‌نامه براساس یک سری فرضیات انجام گرفته است. فرض اول به این صورت است که دسترسی به داده‌های ماهانه‌ی سطح‌دو^۴ نسخه‌ی پنج^۵ مرکز پردازش CSR^۶ ماهواره‌ی ثقل‌سنجی GRACE، از طریق این سایت تا پایان سال ۲۰۱۶ میسر است. فرض دوم دسترسی به مشاهدات ماهانه‌ی چاه‌های پی‌زومتری، دو استان خراسان رضوی و خراسان جنوبی از شرکت مدیریت منابع آب ایران (تهران) است و فرض آخر، اینکه دسترسی به مدل جهانی هیدرولوژی GLDAS برای محاسبه تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی در ایران نیز امکان‌پذیر

¹ Global Land Data Assimilation System

² Wavelet

³ Gaussian

⁴ Level 2

⁵ Release 05

⁶ UTCSR (Center for Space Research at the University of Texas)

باشد.

۱-۵- ساختار پایان نامه

فصل‌های مختلف پایان نامه به شرح زیر است: در فصل دوم ابتدا به مرور تحقیقات انجام شده‌ی خارجی و سپس به مرور مطالعات پژوهشگران داخلی پرداخته می‌شود. در فصل سوم ابتدا به ارائه‌ی مفهومی از میدان ثقل و انواع آن پرداخته، سپس به معرفی ماهواره‌ی ثقل‌سنجی GRACE و بعضی از ویژگی‌ها و مشخصات این ماهواره، داده‌ها و تکنیک‌های بکاررفته در آن پرداخته می‌شود. همچنین ضرایب هارمونیک کروی، مدل جهانی هیدرولوژی GLDAS، تعیین تغییرات جرم با استفاده از ضرایب هارمونیک کروی در قالب ضخامت لایه‌ی آب معادل، اعداد لاو و توابع وابسته لژاندر توضیح داده شده و بعد از معرفی فیلتر گوسین، روش موجک و توابع مقیاس و نحوه‌ی استفاده از آن‌ها در داده‌های ماهواره‌ی GRACE، در انتهای فصل روش انجام کار توضیح داده می‌شود. در فصل چهارم به نتایج تغییرات سالانه‌ی آب‌های زیرزمینی به کمک فیلتر گوسین و روش موجک پرداخته و در آخر فصل صحت‌سنجی نتایج بیان شده‌است. در فصل پنجم به جمع‌بندی نتایج و ارائه پیشنهادات پرداخته و نهایتاً در فصل ششم به مراجع استفاده شده در این پایان نامه اشاره شده‌است.

۲- فصل دوم

مروری بر تحقیقات پیشین

۲-۱- مقدمه

بدون شک اولین قدم در انجام هرگونه تحقیق، مطالعه دقیق کارهای پژوهشی انجام گرفته در این زمینه می‌باشد. از جمله مطالبی که در این فصل آورده شده است، مجموعه‌ای از تحقیقات صورت گرفته در بکارگیری از ماهواره‌های ثقل‌سنجی GRACE، به همراه استفاده از مدل‌ها و روش‌های دیگر بمنظور برآورد سطح آب‌های زیرزمینی است.

۲-۲- پیشینه‌ی خارجی تحقیق

وار و همکاران در سال ۲۰۰۴، در مطالعه تغییرات دینامیک ثقل ماهواره‌ی GRACE، با استفاده از داده‌های یازده‌ماهه‌ی این ماهواره به بررسی تغییرات ذخایر آب در سه حوزه آبی می‌سی‌سی‌پی، آمازون و خلیج بنگال پرداختند. نتایج به این صورت بود که در شعاع نرم‌کنندگی^۱ ۱۰۰۰ کیلومتری که منجر به دقت ۱/۵ سانتیمتر شد، نتایج بدست آمده ۳۰٪ بهتر از شعاع ۱۵۰۰ کیلومتری و ۴۰٪ بدتر از شعاع ۷۵۰ کیلومتری بود [۲۰].

اندرسون و همکاران در سال ۲۰۰۵، تغییرات ذخیره‌ی آب زمینی را با استفاده از ماهواره‌ی GRACE و مدل GLDAS بین سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۳ میلادی در اروپای مرکزی بررسی نمودند و برای صحت‌سنجی، از دو ایستگاه زمینی اندازه‌گیری تغییرات گرانش زمین استفاده کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که مقدار ذخیره‌ی آب زمینی در سال ۲۰۰۳ کاهشی در حدود ۸ سانتی‌متر را تجربه کرده‌است که این کاهش می‌تواند به علت موج گرمای بی‌سابقه در سال ۲۰۰۳ باشد. همچنین دقت مناسب داده‌های ماهواره‌ی GRACE با ایستگاه‌های زمینی اندازه‌گیری تغییرات گرانش زمین و همچنین تطابق داده‌های ماهواره‌ی GRACE با مدل GLDAS از دیگر نتایج این مطالعه بود [۲۱].

¹ Smoothing

اوانگه و همکاران در سال ۲۰۰۸، با استفاده از داده‌های ۴۵ ماهه‌ی ماهواره‌ی GRACE که از آوریل سال ۲۰۰۲ تا آوریل سال ۲۰۰۶ مورد استفاده قرار گرفت، میزان تغییرات در آب ذخیره‌شده‌ی دریاچه‌ی ویکتوریا در آفریقا را مورد ارزیابی قرار دادند. دریاچه‌ی ویکتوریا دومین دریاچه‌ی بزرگ آب‌شیرین در جهان است که از سال ۲۰۰۱ میزان آب در آن در حال کاهش است. نتایج این تحقیق نشان داد، که میزان آب در سطح دریاچه‌ی ویکتوریا با نرخ $1/83$ کیلومتر مکعب در ماه در حال کاهش است [۲۲].

استراسبرگ و همکاران در سال ۲۰۰۹، از توانایی ماهواره‌ی GRACE برای نظارت بر ذخیره‌ی آب‌های زیرزمینی در یک دشت نیمه‌خشک در ایالات متحده آمریکا استفاده کردند. منطقه‌ی مطالعاتی تحقیق مذکور در مناطق نیمه‌خشک و بیابانی قرار داشت که سطح آب‌های زیرزمینی آن عمیق و با میانگین ۳۰ متر از سطح زمین قرار داشت. همچنین دارای تغییرات ذخیره‌سازی فصلی شدید ناشی از آبیاری زیاد، در فصول مناسب کشاورزی بود. نتایج این مطالعه نشان داد که مقادیر ذخیره‌ی آب زمینی سنجش‌شده توسط ماهواره‌ی GRACE، از همبستگی بسیار خوبی با داده‌های برداشت‌شده توسط USGS^۱ برخوردار است و می‌تواند با دقت مناسبی برای تحلیل تغییرات ذخیره‌ی آب زمینی در مناطق فاقد آمار مورد استفاده قرار گیرد [۲۳].

لانگورن و همکاران در سال ۲۰۱۰، در حوضه‌ای به مساحت ۲۰۰ هزار کیلومتر مربع داده‌های ماهواره‌ی ثقل‌سنجی GARCE را که از مراکز داده‌ی CSR و GRGS^۲ دریافت کرده بودند طی سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۷ مورد ارزیابی قرار دادند. در این تحقیق از فیلتر گوسین با شعاع میانگین‌گیری ۳۰۰ بر روی داده‌های ماهواره‌ی GRACE استفاده شد. پس از مقایسه‌ی روند تغییرات ذخیره‌ی آب با استفاده از مدل GLDAS، ماهواره‌ی GRACE و داده‌های چاه‌های پیژومتری، نتایج حاصل، بیانگر این مطلب بود که ماهواره‌ی GRACE روند تغییرات ذخیره‌ی آب را نسبت به مدل GLDAS بهتر نشان می‌دهد [۲۴].

¹ United States Geological Survey

² Groupe De Recherche De Geodesie Spatiale

مویوو و همکاران در سال ۲۰۱۲، با استفاده از ماهواره‌ی GRACE، مدل GLDAS، داده‌های بارش اندازه‌گیری شده در حوضه و معادله‌ی بیلان آب، مقدار ذخیره‌ی آب زیرزمینی را در منطقه‌ای در شمال چین که از مراکز مهم تولید غلات در این کشور است طی سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۹ میلادی بدست‌آوردند. علاوه براین، با استفاده از ماهواره‌ی GRACE، تغییرات ماهیانه و سالیانه‌ی ذخیره‌ی آب زیرزمینی را نیز محاسبه کردند. نتایج مقایسه‌ی این دو سری داده، در مقیاس ماهیانه $R^2 = 0.65$ و در مقیاس سالیانه $R^2 = 0.8$ را نشان می‌دهد. همچنین نتایج، کاهش ذخایر کلی آب را به طور متوسط به مقدار $16/8$ میلی‌متر در سال نشان می‌دهد [۲۵].

فریرا و همکاران در سال ۲۰۱۳، با استفاده از داده‌های ماهواره‌ی GRACE، ماهواره‌ی TRMM^۲ و مدل GLDAS مقدار کل تخلیه‌ی آب حوضه‌ی یانگ‌تسه در کشور چین را طی سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۹ برآورد کردند. این روش با مقایسه با جریان مشاهده‌شده مورد اعتبارسنجی قرار گرفته است و نتایج این مطالعه نشان‌دهنده‌ی $RMSE=14/3$ میلی‌متر در ماه بین داده‌های ماهواره‌ی GRACE و داده‌های ایستگاهی است [۲۶].

لی و همکاران در سال ۲۰۱۴، بیلان آب در استان گوانگجی در کشور کره‌ی جنوبی را محاسبه کردند و تغییرات ذخیره‌ی آب در آن را با داده‌های ماهواره‌ی GRACE و مدل GLDAS مقایسه کردند. همچنین از نرم‌افزار HEC-HMS^۴ برای کاهش اختلاف بین رواناب شبیه‌سازی شده و مشاهده‌شده استفاده شد. این منطقه شامل چهار حوضه بود. نتایج تحقیق آن‌ها نشان می‌دهد در فصل‌هایی که مقدار بارش زیاد است، داده‌های مدل GLDAS دقت بیشتری نسبت به داده‌های ماهواره‌ی GRACE دارند [۲۷].

چن و همکاران در سال ۲۰۱۶، با هدف یافتن روشی برای افزایش دقت در داده‌های ماهواره‌ی

¹ Coefficient of Determination

² Tropical Rainfall Measuring Mission

³ Root Mean Square Error

⁴ Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System

GRACE، به بررسی داده‌های این ماهواره طی دوره ژانویه ۲۰۰۳ تا دسامبر ۲۰۱۲ پرداختند. در این مطالعه از داده‌های نسخه‌ی پنج مراکز پردازش CSR، GFZ^۱ و JPL^۲ استفاده شد و داده‌های ماهواره‌ی GRACE با استفاده از فیلتر گوسین با شعاع میانگین‌گیری ۳۰۰ کیلومتر اصلاح شدند. مقایسه‌ی تغییرات جرم برمبنای ارتفاع آب معادل در داده‌های اصلاح‌شده و اصلاح‌نشده‌ی ماهواره‌ی GRACE، نشان‌دهنده‌ی بهبود روند تغییرات در داده‌های اصلاح‌شده‌ی این ماهواره است همچنین تغییرات جرم در حوضه‌ی رودخانه‌ی سینت لارنس^۳ (سن لوران) با استفاده از داده‌های اصلاح‌شده‌ی ماهواره‌ی GRACE، تطابق خوبی را با داده‌های مدل GLDAS نشان داد [۲۸].

ژیانگ و همکاران در سال ۲۰۱۶، با استفاده از ماهواره‌ی ثقل‌سنجی GRACE، به بررسی تغییرات ذخیره‌سازی آب‌های زیرزمینی در فلات تبت و مناطق مجاور آن که به هشت زیرحوضه تقسیم‌بندی شده بود طی سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۹ میلادی پرداختند. این تحقیق روند افزایش بر حسب گیگاتن در سال^۴ را، در تمامی حوضه‌ها نشان می‌دهد. که این روند افزایش به احتمال زیاد به دلیل افزایش رواناب ناشی از ذوب برف و یا بارش در محیط اطراف این مناطق می‌باشد [۲۹].

۲-۳- پیشینه‌ی داخلی تحقیق

آل‌محمد در سال ۱۳۸۸، با استفاده از داده‌های ماهواره‌ی ثقل‌سنجی GRACE که به عنوان ورودی در این مطالعه استفاده شده‌است، ارتباط بین تغییرات ذخیره‌ی زمینی آب بر نوسانات تراز آب در یک پهنه‌ی آبی را مورد بررسی قرار داد. در این تحقیق مدلی برای تخمین تغییرات ذخیره‌ی زمینی آب بسط داده‌شد. این مدل همچنین در حوضه‌ی آبریز دریاچه‌ی خزر که یکی از حوضه‌های آبریز اصلی کشور بشمار

^۱ GeoForschungsZentrum Or GFZ Information and data system

^۲ Jet Propulsion Laboratory

^۳ Saint Lawrence

^۴ Gt/yr

می‌رود، مورد استفاده قرار گرفت و میزان تغییرات ذخیره‌ی زمینی آب در این حوضه بررسی شد. سپس با ارتباط دادن این تغییرات حجم به تغییرات تراز آب دریای خزر، میزان این تغییرات تراز محاسبه شد. نتایج نشان‌دهنده‌ی این مطلب است که تغییرات ذخیره‌ی زمینی آب در حوضه‌ی آبریز دریاچه‌ی خزر می‌تواند موجب افزایش تراز آب تا ارتفاعی معادل ۱۰ میلیمتر در سال در این دریاچه شود [۳۰].

نجفی علمداری و همکاران در سال ۱۳۸۹، با پردازش یک سری زمانی ۷۲ ماهه از داده‌های ماهواره‌ی ثقل‌سنجی GRACE طی سال ۲۰۰۳ تا سال ۲۰۰۹ میلادی، تغییرات جرم بر حسب ضخامت لایه‌ی آب معادل در سراسر ایران را محاسبه کردند. در این تحقیق برای از بین بردن خطای نواری از داده‌های ماهواره‌ی ثقل‌سنجی GRACE، از دو فیلتر میانگین‌گیری کامل و گوسی بر روی داده‌ها استفاده شد و در نهایت، فیلتر گوسین با شعاع میانگین‌گیری ۷۵۰ کیلومتر که نتایج بهتری را در جهت حذف نوارها در سطح ایران بدست می‌دهد، انتخاب شد. سپس تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی در سراسر ایران را به کمک دو خروجی مدل هیدرولوژی GLDAS یعنی رطوبت خاک و آب موجود در پوشش برف و چاه‌های پیژومتری، در همان بازه زمانی بدست آوردند. نتایج، تطابق بسیار مناسبی را میان تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی بدست‌آمده از ماهواره‌ی ثقل‌سنجی GRACE و مشاهدات زمینی نشان می‌دهد [۳۱].

کمیلیان در سال ۱۳۹۱، به بررسی تغییرات ماهیانه‌ی ذخیره‌ی زمینی آب در کشور ایران پرداخت. در این تحقیق با استفاده از یک روش معکوس خطی و بر پایه روش حداقل مربعات، از داده‌های ماهواره‌ی ثقل‌سنجی GRACE به عنوان ورودی و از نتایج مدل جهانی هیدرولوژی WGHM^۱ به عنوان جواب اولیه در آن استفاده شد، همچنین به کمک دو خروجی مدل GLDAS یعنی رطوبت خاک و آب موجود در پوشش برف و با استفاده از رابطه بیلان آب، تغییرات ذخیره‌ی آب زیرزمینی بدست آمد. نتایج نشان می‌دهد که این روش دقت خوبی در محاسبه تغییرات ذخیره‌ی زمینی در حوزه‌های بزرگ دارد. از طرفی با توجه به

^۱ WaterGAP Global Hydrological Model

نتایج تغییرات ذخیره آب زیرزمینی، این روش توانایی مناسبی برای شناسایی نقاط بحرانی دارد [۳۲]. شریفی و همکاران در سال ۱۳۹۳، از داده‌های سطح دو ماهواره‌ی ثقل‌سنجی GRACE مربوط به مرکز CSR، به منظور ارزیابی توانایی پایش خشکسالی در کشور ایران استفاده کردند. نتایج نشان‌دهنده‌ی کاهش سطح آب معادل طی سال ۲۰۰۷ تا سال ۲۰۱۰ میلادی می‌باشد. در مقابل نتایج بدست‌آمده از دو خروجی مدل جهانی هیدرولوژی GLDAS یعنی رطوبت موجود در لایه‌ی ریشه‌ای خاک و آب موجود در پوشش برف هیچ‌گونه کاهش را طی دوره‌ی مذکور نشان نمی‌دهد. در نهایت به منظور ارزیابی صحت نتایج بدست‌آمده، از داده‌های میزان بارش ماهیانه‌ی ثبت‌شده توسط ایستگاه‌های هواشناسی در سطح کشور استفاده شد، که تغییرات میزان نزولات جوی طی دوره‌ی زمانی مذکور نشان‌دهنده‌ی کاهش میزان بارش طی دوره مورد نظر است که با نتایج ماهواره‌ی GRACE مطابقت کامل دارد [۳۳].

فرخ‌نیا و مرید در سال ۱۳۹۳، با استفاده از اطلاعات ماهواره‌ی ثقل‌سنجی GRACE و مدل GLDAS، مؤلفه‌های بیلان آب و تغییرات ذخیره‌ی آب زیرزمینی در حوضه‌ی دریاچه‌ی ارومیه را مورد بررسی قرار دادند. مقایسه مقادیر برآورد شده تغییرات بیلان کل آب در حوضه توسط GRACE و تغییرات مشاهداتی حجم آب دریاچه نشان‌دهنده‌ی وجود روند یکسان می‌باشد. همچنین برآورد تغییرات سالانه آب‌زیرزمینی نیز با استفاده از اطلاعات GRACE و GLDAS انجام شد که نشان‌دهنده‌ی قابلیت مناسب اطلاعات GRACE برای برآورد روند تغییرات آب‌زیرزمینی می‌باشد. نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد اطلاعات حاصل از GRACE می‌تواند به عنوان ابزار مناسبی برای انجام برآوردهای اولیه، سریع و کم‌هزینه در خصوص بیلان آب در حوضه‌های آبریز کشور مورد استفاده قرار گیرد [۳۴].

جودکی و همکاران در سال ۱۳۹۳، در تحقیقی که برای برآورد سهم انسانی در تخلیه‌ی آب‌های زیرزمینی طی فوریه سال ۲۰۰۳ تا دسامبر سال ۲۰۱۲ انجام گرفت با استفاده از مشاهدات ماهواره‌های ثقل‌سنجی GRACE، مدل آب‌های سطحی زمین و مشاهدات چاه‌های پیژومتری به بررسی تغییرات ماهیانه

آب‌های زیرزمینی در منطقه خاورمیانه پرداختند. نتایج نشان‌دهنده‌ی کاهش چشمگیر ذخایر آب در غرب ایران و شمال عراق بود. همچنین با حذف اثرات طبیعی کاهش آب‌های زیرزمینی با مدل CLM¹، به این نتیجه دست یافتند که بیش از نیمی از کاهش آب‌های زیرزمینی در این منطقه به‌دلیل برداشت بی‌رویه آب است [۸].

اشرف‌زاده در سال ۱۳۹۴، از داده‌های سطح دو ماهواره‌ی ثقل‌سنجی GRACE، برای برآورد تغییرات ماهیانه سطح آب‌های زیرزمینی جنوب کشور ایران طی دوره آگوست ۲۰۰۲ تا آوریل ۲۰۱۵ استفاده کردند. نتایج، نشان‌دهنده‌ی کاهش شدید روند سطح آب‌های زیرزمینی در حدود ۵۰۲ کیلومترمکعب طی دوره آگوست ۲۰۰۲ تا سپتامبر ۲۰۱۲ در مرکز، غرب و جنوب ایران است و با حذف سهم رطوبت خاک، برف و آب‌های سطحی با استفاده از مدل GLDAS، نشان داده شد که بیشترین کاهش آب در درازمدت به دلیل کاهش آب‌های زیرزمینی است. همچنین با استفاده از مدل CLM4 و حذف اثرات کاهش طبیعی آب‌های زیرزمینی از کل آب‌های زیرزمینی، کاهش انسانی آب‌های زیرزمینی برآورد شد. نتایج این موضوع را می‌رساند که کاهش سطح آب‌های زیرزمینی در جنوب کشور به دلیل خشکسالی بعد از سال ۲۰۰۷ است و می‌توان این موضوع را مطرح کرد که خشکسالی آتی، خطر کاهش آب زیرزمینی در این منطقه را تشدید می‌کند [۳۵].

فرجی و همکاران در سال ۱۳۹۵، پژوهشی را با هدف ارزیابی داده‌های ماهواره‌ی ثقل‌سنجی GRACE برای یافتن راه‌حلی جامع برای دستیابی آسان و سریع به اطلاعات تغییرات منابع آبی استان قزوین انجام دادند. برای اعتبارسنجی داده‌های ماهواره‌ی GRACE از داده‌های مدل سطح زمین GLDAS و داده‌های مشاهداتی چاه‌های پیژومتری در منطقه استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد ماهواره‌ی GRACE به عنوان ماهواره‌ی ثقل‌سنج که فقط بمنظور برآورد تغییرات ذخیره‌ی آب تولید شده است، برآورد خوبی

¹ Community Land Model

از روند تغییرات ذخیره‌ی آب و همچنین تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی در اختیار کاربران قرار می‌دهد. نتایج تحلیل آماری انجام‌شده نشان‌دهنده‌ی $RMSE = 5/54$ در واحد سانتی‌متر در مقیاس فصلی بین داده‌های تغییرات سطح آب‌زیرزمینی بدست‌آمده از GRACE و چاه‌های مشاهداتی در دشت قزوین و همچنین $RMSE = 5/46$ سانتی‌متر در ماه بین داده‌های تغییرات ذخیره‌ی آب بدست‌آمده از مدل GLDAS و ماهواره‌ی GRACE است. همچنین همبستگی بین داده‌های تغییرات ذخیره‌ی آب بدست‌آمده از مدل GLDAS و ماهواره‌ی GRACE و تغییرات سطح آب‌زیرزمینی بدست‌آمده از ماهواره‌ی GRACE و داده‌های مشاهداتی در سطح احتمال ۹۹ درصد معنادار است. نتایج بیانگر آن است که ماهواره‌ی GRACE روند تغییرات ذخیره‌ی آب را بهتر از مدل GLDAS نشان می‌دهد [۳۶].

غلامیان و موسوی در سال ۱۳۹۵، در تحقیقی با استفاده از نتایج حاصل از داده‌های ماهواره‌ی ثقل‌سنجی GRACE به‌همراه مدل هیدرولوژیکی GLDAS و تداخل‌سنجی راداری، تغییرات میزان آب‌های زیرسطحی و فرونشست زمین را در دشت قزوین مورد ارزیابی قرار دادند. که نتایج نشان‌دهنده‌ی کاهش سطح آب و در نتیجه فرونشست سطح زمین طی سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۹ میلادی در محدوده‌ی مورد مطالعه در حدود ۱۷/۵ میلی‌متر بر سال می‌باشد. همچنین با مقایسه‌ی نقشه‌های تهیه‌شده، بیشترین میزان کاهش سطح آب و فرونشست در مناطقی رخ داده‌است که بالاترین تعداد چاه‌های عمیق برای استخراج آب‌های زیرزمینی را، نسبت به سایر نقاط داراست [۳۷].

۳- فصل سوم

مواد و روش‌ها

ژئودزی^۱ شاخه‌ای از علوم زمین است که به اندازه‌گیری و نمایش شکل و ابعاد زمین، ویژگی‌های هندسی، تعیین موقعیت دقیق بر روی آن، بررسی میدان ثقل زمین و تغییرات زمانی آن می‌پردازد. ژئودزین‌ها به مطالعه‌ی پدیده‌های ژئودینامیکی مانند حرکات پوسته‌ی زمین، جزرومد و حرکات قطبی زمین می‌پردازند. یکی از کاربردهای دیگر ژئودزی در بحث تعیین مدار ماهواره‌ها و پیش‌بینی موقعیت آن‌هاست. ژئودزی از آن جهت که آگاهی بیشتری نسبت به میدان ثقل زمین دارد می‌تواند امکان تحلیل و بررسی حرکات ماهواره‌ها را در این میدان، برای سایر تخصص‌های مرتبط با فناوری‌های ماهواره‌ای فراهم آورد. ژئودزی از شاخه‌های گوناگونی تشکیل شده است که یکی از مهم‌ترین شاخه‌های آن ژئودزی ماهواره‌ای^۲ یا زمین‌سنجی ماهواره‌ای است. که در آن از انواع مشاهدات ماهواره‌ای برای کشف مجهولات هندسی و اهداف علم ژئودزی استفاده می‌شود.

۳-۲- زمین و میدان ثقل آن

برای جسمی که هم دارای نیروی جاذبه می‌باشد و هم دارای نیروی گریز از مرکز است، می‌توان یک میدان نیروی کلی در نظر گرفت که حاصل جمع برداری این دو میدان است. این میدان را، میدان ثقل^۳ می‌نامند و به هر جسمی که در حوزه‌ی اتمسفر زمین قرار داشته باشد این نیرو وارد می‌شود. اگر شتاب گریز از مرکزی که به جسم وارد می‌شود بیشتر از شتاب جاذبه باشد، جسم از زمین دور می‌شود و اگر شتاب جاذبه‌ای که به جسم وارد می‌شود بیشتر از شتاب گریز از مرکزی باشد که به جسم وارد می‌شود، جسم به سمت زمین کشانده خواهد شد. راستای این دو نیرو در خلاف جهت یکدیگر می‌باشد و مقدار نیروی ثقل در قطبین کره‌ی زمین به دلیل صفر شدن نیروی گریز از مرکز به بیشترین

¹ Geodesy

² Satellite Geodesy

³ Gravity

مقدار خود می‌رسد. میدان ثقل زمین را می‌توان به دو بخش تقسیم‌بندی کرد: ۱- میدان گرانش استاتیک^۱ و ۲- میدان گرانش دینامیک^۲.

۳-۲-۱- میدان گرانش استاتیک

این جزء از میدان گرانش حدود ۹۹ درصد از کل میدان گرانش زمین را شامل می‌شود و ناشی از جرم جامد زمین است که در بازه‌های زمانی بسیار طولانی تغییر می‌کند و مقدار آن را می‌توان به راحتی با در نظر گرفتن یک سطح واحد زمین، از روی مشاهدات درازمدت ماهواره‌ها بدست آورد [۳۸].

۳-۲-۲- میدان گرانش دینامیک

این جزء از میدان گرانش عامل اصلی در تغییرات زمانی میدان گرانش زمین در بازه‌های کوتاه مدت است و عامل اصلی این تغییرات، جابجایی جرم آب در سطح و زیرزمین است که به طور دائم توسط چرخه‌های هیدرولوژیکی در بین مناطق مختلف زمین در حال جابجایی است [۳۸].

۳-۳- ماهواره‌های ثقل سنجی

۳-۳-۱- مقدمه

ماهواره محاسبه‌ی ثقل و یا پارامترهای وابسته به ثقل یکی از مهم‌ترین پارامترهای مهم و مطرح در ژئودزی و ژئوفیزیک است. یکی از روش‌های محاسبه‌ی کمیت ثقل، استفاده از داده‌ها و یا به عبارتی دیگر استفاده از مأموریت‌های فضایی ثقل سنجی است [۳۹]. از مهم‌ترین ماهواره‌های ثقل سنجی می‌توان به ماهواره‌های CHAMP^۳، GOCE^۴ و GRACE اشاره کرد. هر یک از ماهواره‌های فوق کاربردهای زیادی در علوم مختلف از جمله ژئودزی، ژئوفیزیک، اقیانوس‌شناسی، اقلیم‌شناسی، پایش تغییرات سطح دریا و

¹ Static Geopotential

² Dynamic Geopotential

³ CHALLENGING Minisatellite Payload

⁴ Gravity Field and Steady – State Ocean Circulation Explorer

سنجش تغییرات میدان ثقل زمین دارند.

به عنوان مثال در ژئوفیزیک، در اختیار داشتن اطلاعات بهتر در مورد میدان ثقل زمین، منجر به داشتن داده‌های مرزی دقیق‌تر برای مطالعات ساختار درونی زمین می‌شود. در ژئودزی نیز داشتن یک ژئوئید دقیق به عنوان سطح مبنای ارتفاعی، مورد نیاز است که لازمه‌ی این امر، مدل‌سازی دقیق میدان ثقل زمین می‌باشد. روش‌های ثقل‌سنجی زمینی و ثقل‌سنجی با هواپیما جهت تعیین میدان ثقل زمین، دارای پوشش جهانی نمی‌باشد. برخلاف این روش‌ها، روش‌های ماهواره‌ای دارای پوشش جهانی هستند. همچنین، با توجه به اندازه‌گیری‌های پیوسته، می‌توان از روش‌های فضایی جهت مطالعه‌ی تغییرات میدان ثقل زمین استفاده نمود [۴۰]. در ادامه به معرفی بعضی از ویژگی‌ها و مشخصات ماهواره‌ی ثقل‌سنجی GRACE و تکنیک‌های بکاررفته در آن می‌پردازیم.

۳-۳-۲- ماهواره‌ی ثقل‌سنجی GRACE

پروژه‌ی ماهواره‌ی بازیابی گرانش و آزمایش اقلیمی، یا به اختصار ماهواره‌ی ثقل‌سنجی GRACE، یک پروژه‌ی مشترک بین سازمان ملی هوانوردی و فضایی آمریکا (NASA)^۱ و مرکز هوافضای آلمان (DLR)^۲ است که در ۱۷ ماه مارس سال ۲۰۰۲ میلادی از ایستگاه فضایی پلستسک^۳ در روسیه به فضا پرتاب شد. این پروژه از دو ماهواره‌ی مشابه و مجزا از هم تشکیل شده‌است که در ارتفاع حدود ۵۰۰ کیلومتری از سطح زمین و با فاصله‌ی ۲۲۰ کیلومتری از هم در حال حرکت می‌باشند [۴۱]. لازم به ذکر است، اگرچه طول عمر برنامه‌ریزی شده‌ی این پروژه ۵ سال بوده‌است ولی این ماهواره‌ها همچنان قابل استفاده می‌باشند.

^۱ National Aeronautics and Space Administration

^۲ Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

^۳ Plesetsk



شکل ۳-۱: ماهواره‌ی ثقل‌سنجی GRACE

۳-۲-۱- مشخصات اصلی ماهواره‌ی ثقل‌سنجی GRACE

- ارتفاع مداری حداقل: ۴۸۳ کیلومتر و ارتفاع مداری حداکثر: ۵۰۸ کیلومتر

- زاویه‌ی میل: ۸۹ درجه

- ابعاد: طول ۳/۱۲۳ متر، عرض ۱/۹۴۲ متر، ارتفاع ۰/۷۲ متر

- تعداد دوران مداری: هر دو ماهواره هر ۹۱ دقیقه یکبار مدار خود را به‌طور کامل طی می‌کنند

- وزن هر ماهواره ۴۸۷ کیلوگرم می‌باشد

۳-۲-۲- نمونه‌ای از ابزارهای بکاررفته در ماهواره‌ی ثقل‌سنجی GRACE

- سیستم KBR^۱: فاصله‌ی نسبی بین دو ماهواره و تغییرات این فاصله، توسط سیستم فوق‌العاده

دقیق ماکروویو در باند K با دقت ۱۰ میکرومتر اندازه‌گیری می‌شود [۴۲].

- نوسان‌ساز فرا ثابت USO^۲: این نوسان‌ساز برای تولید فرکانس موردنیاز برای سیستم فاصله‌سنج

ماکروویو بکار رفته در ماهواره‌ها موردنیاز است [۳۵].

^۱ K-band Ranging System

^۲ Ultra Stable Oscillator

- شتابسنج ACC^۱: هر یک از زوج ماهواره‌ی ثقل‌سنجی GRACE، به یک شتابسنج سه‌محوره دقیق، موسوم به شتابسنج سوپر - استار در مرکز جرم خود مجهز هستند. این شتابسنج‌ها برای اندازه‌گیری شتاب غیرگرانشی وارد بر ماهواره‌های GRACE استفاده می‌شوند [۴۲].

- سیستم عکس‌برداری از ستارگان SCA^۲: از این سیستم برای تعیین دقیق جهت‌یابی دو ماهواره، بوسیله‌ی ردیابی آن‌ها، نسبت به موقعیت ستاره‌ها، استفاده می‌شود.

- سیستم انطباق مراکز ثقل MTA^۳: مرکز ثقل ماهواره باید بر مرکز ثقل شتابسنج منطبق باشد. سیستم انطباق مراکز ثقل این اختلاف را محاسبه کرده و مرکز جرم ماهواره را در طول مدت پرواز در صورت نیاز، تنظیم می‌کند.

- گیرنده‌ی فضایی GPS^۴: روی هر یک از زوج ماهواره‌ی GRACE، یک گیرنده‌ی دو بسامدی ۲۴

۲۴

کاناله‌ی سامانه‌ی موقعیت‌یاب جهانی، موسوم به بلک - جک نصب شده‌است. مشخصه‌ی مهم این نوع گیرنده، استحکام زیاد آن در مقابل مقاومت هوا است. با استفاده از مشاهدات گیرنده‌ی فوق و همچنین اندازه‌گیری‌های سامانه‌ی SLR^۵، موقعیت و سرعت هر دو ماهواره با دقت بالایی محاسبه می‌شود [۴۲]. لازم به ذکر است که سامانه‌ی بلک - جک، بردار موقعیت زوج ماهواره‌ی GRACE را، به عنوان مشاهدات SST-HL با بسامد نمونه‌برداری کمتری نسبت به سامانه‌ی KBR، یعنی با بسامد ۰/۱ هرتز تأمین می‌کند [۴۳].

- سلول خورشیدی سیلیکونی GSA^۶: پوسته‌ی بیرونی فضاپیما را، ردیفی از سلول‌های خورشیدی

¹ SuperSTAR Accelerometers

² Star Camera Assembly

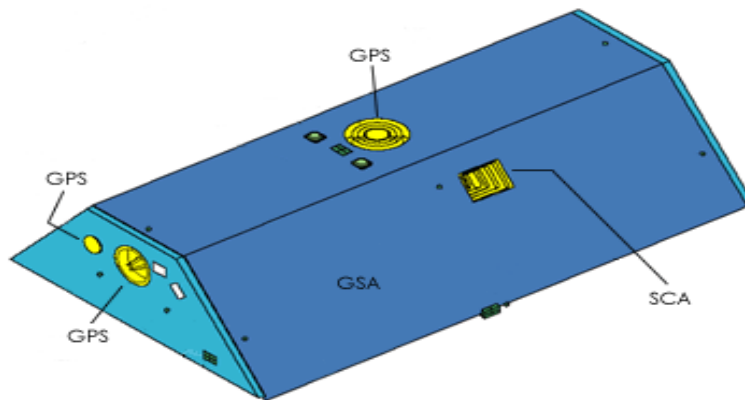
³ Center of Mass Trim Assembly

⁴ BlackJack GPS Receiver and Instrument Processing Unit

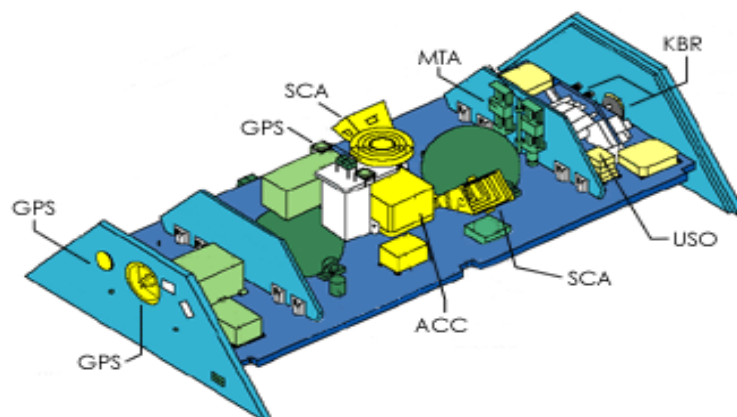
⁵ Satellite Laser Ranging

⁶ Globalstar Silicon Solar Cell Arrays

سیلیکونی پوشش می دهند که وظیفه تولید انرژی را برعهده دارند. این سلولها توسط یک شرکت آمریکایی به نام گلوبال استار ساخته شده اند.



شکل ۳-۲: نمای بالایی ماهواره‌ی ثقل‌سنجی GRACE [۴۴]



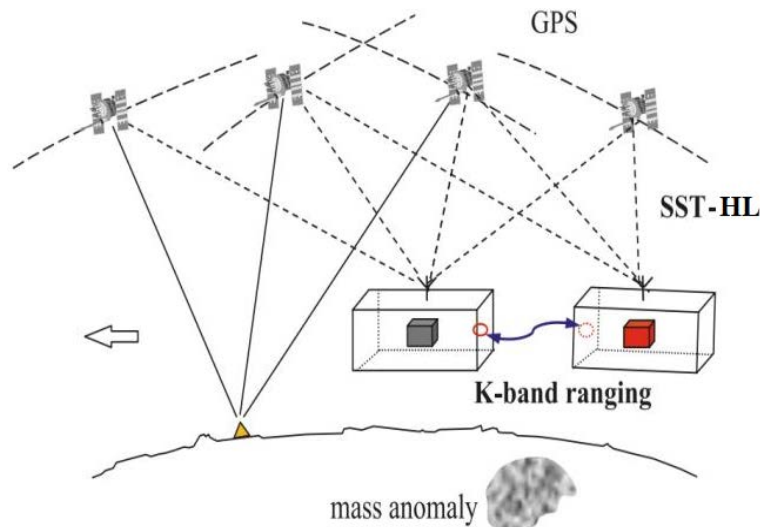
شکل ۳-۳: نمای داخلی ماهواره‌ی ثقل‌سنجی GRACE [۴۴]

۳-۲-۳-۳ ساختار مأموریت ماهواره‌ی ثقل‌سنجی GRACE

در این ماهواره از تکنیک ردیابی ماهواره به ماهواره (SST) با ساختاری تلفیقی از دو آرایش HL (ردیابی یک ماهواره‌ی ثقل‌سنجی با ارتفاع مداری پایین نسبت به چند ماهواره‌ی تعیین موقعیت ژئودتیک با ارتفاع مداری بالا مانند GPS) و ¹LL (ردیابی دو ماهواره‌ی ثقل‌سنجی با ارتفاع مداری پایین نسبت به

¹ Low-Low

یکدیگر) استفاده شده است. در این مأموریت با استفاده از ساختار SST-HL، بردار موقعیت هر یک از زوج ماهواره مشاهده می‌شود. همچنین مطابق با ساختار SST-LL دو ماهواره‌ی ثقل‌سنجی در یک مدار به‌دنبال هم در حرکت هستند. در این تکنیک، زوج ماهواره در ساختار LL به یک سامانه‌ی فاصله‌یابی بین ماهواره‌ای موسوم به KBR، مجهز است که فاصله‌ی بین دو ماهواره و تغییرات آن، با امواج ماکروویو با دقت ۱۰ میکرومتر اندازه‌گیری می‌کند. با آنالیز این حرکت‌نسبی، طول موج‌های بلند و متوسط میدان ثقل تعیین می‌گردد [۴۵].



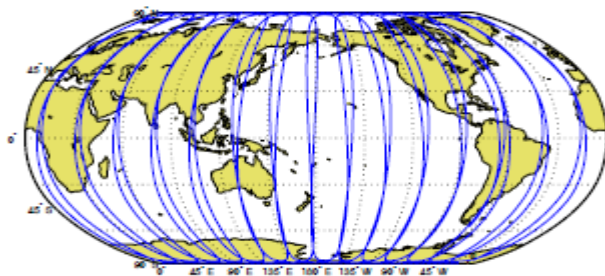
شکل ۳-۴: ساختار مأموریت ماهواره‌ی ثقل‌سنجی GRACE

۳-۲-۴- اهداف ماهواره‌ی ثقل‌سنجی GRACE

مأموریت زوج ماهواره‌ی GRACE، یک مأموریت ثقل‌سنجی ماهواره‌ای می‌باشد که یکی از اهداف آن، جمع‌آوری داده‌های جاذبی موردنیاز برای تعیین میدان ثقل جهانی و تغییرات زمانی این میدان در قالب مدل‌های ژئوپتانسیلی مشتمل بر مؤلفه‌های هارمونیک از درجه و مرتبه‌ی ۲ تا درجه و مرتبه‌ی ۱۲۰ ضرایب هارمونیک کروی^۱ معادل با قدرت تفکیک مکانی از ۴۰۰ کیلومتر تا ۴۰۰۰۰ کیلومتر در هر ۳۰

¹ Spherical Harmonic Coefficients

روز می‌باشد [۴۶]. در کنار این هدف اصلی، جمع‌آوری داده‌های موردنیاز به منظور تحقیق در خصوص تأثیر شکست تروپوسفری و یونوسفری بر روی سیگنال‌های سامانه‌ی تعیین موقعیت ماهواره‌ای مانند GPS به مثابه هدف فرعی این مأموریت معرفی شده‌است [۴۷].



شکل ۳-۵: نحوه‌ی شکل‌گیری مدارهای زوج ماهواره‌ی ثقل‌سنجی GRACE در دوره‌ی یک روزه [۴۷]

۳-۲-۵- داده‌های ماهواره‌ی ثقل‌سنجی GRACE

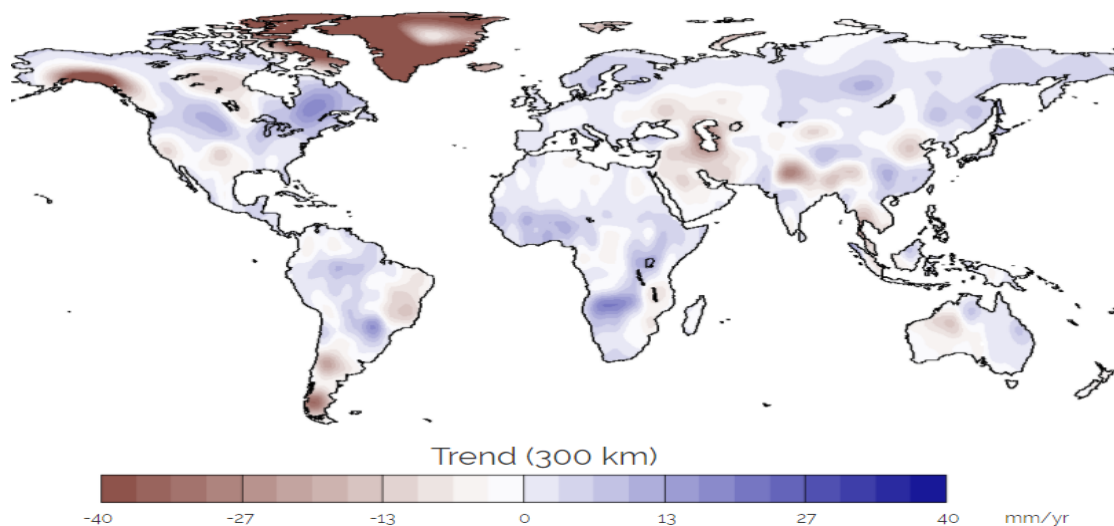
وظیفه‌ی پردازش و ذخیره‌سازی داده‌های ماهواره‌ی ثقل‌سنجی GRACE، توسط سه مرکز لابراتوار پیش‌رانش جت (JPL) در ناسا، مرکز تحقیقات جغرافیایی (GFZ) در آلمان و مرکز تحقیقات فضایی دانشگاه تگزاس آمریکا (UTCSR) صورت می‌گیرد. داده‌های این ماهواره شامل چهار بخش سطح صفر، سطح A₁، سطح B₁ و سطح ۲ می‌باشند. داده‌های سطح صفر ماهواره‌ی GRACE، شامل اطلاعات خام و پردازش‌نشده‌ی دریافتی از ماهواره است که توسط مرکز داده‌های خام (RDC¹) در مؤسسه‌ی DLR آلمان بایگانی می‌شوند. در داده‌های سطح A₁ با اعمال ضرایب کالیبراسیون^۲، مشاهدات سطح صفر به واحدهای مهندسی و قابل‌استفاده تبدیل می‌شوند. این سطح از داده‌ها به صورت عمومی منتشر نشده‌اند. محصولات داده‌های سطح B₁ شامل مشاهدات کالیبره و تصحیح‌شده‌ی فاصله‌ی بین دو ماهواره، نرخ تغییرات آن و همچنین داده‌های سیستم تعیین موقعیت جهانی است که به صورت صحیح و یکسان زمان‌بندی شده و تعداد مشاهدات آن نسبت به سطح قبل کاهش می‌یابد. داده‌های سطح ۲ ماهواره‌های

¹ Raw Data Center

² Calibration

GRACE، مجموعه‌ای از ضرایب هارمونیک کروی را فراهم می‌کنند و در دو بخش ضرایب هارمونیک کروی متوسط چند ساله که بخش استاتیک ثقل را نشان می‌دهد و ضرایب هارمونیک کروی ماهیانه که بخش دینامیک ثقل را نشان می‌دهد، قابل دسترسی برای کاربران می‌باشند [۴۸]. لازم به ذکر است که داده‌های ماهواره‌ی ثقل‌سنجی GRACE از مرکز تحقیقات فضایی تگزاس^۱ و PO.DAAC^۲ قابل دریافت هستند.

همچنین برای راحتی کاربرانی که نیازمند استفاده از محصولات چگون نقشه‌ی نوسانات جرم هستند، گروه‌های جانبی دیگری این محصولات را به صورت استاندارد و با ابزاری مشخص ارائه می‌دهند. در این زمینه سه گروه GRACE Tellus^۳، CU GRACE^۴ و ICGEM^۵ فعالیت می‌کنند. برای نمونه نقشه‌هایی از روند تغییرات جرم در سطح جهانی که از سایت CU GRACE گرفته شده‌است در زیر نشان داده شده‌است.



شکل ۳-۶: روند تغییرات جرم بر حسب میلی‌متر در سال با استفاده از داده‌های سطح ۲ نسخه‌ی ۵ مرکز CSR و شعاع میانگین‌گیری ۳۰۰ کیلومتر [۴۹]

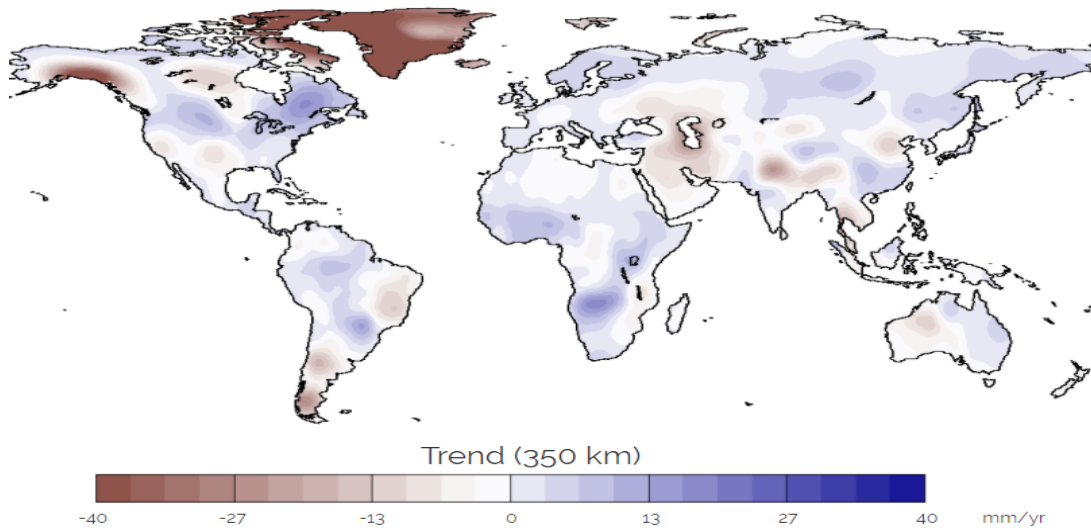
¹ <http://www2.csr.utexas.edu/grace/>

² Physical Oceanography Distributed Active Archive Center - <ftp://podaac-ftp.jpl.nasa.gov/>

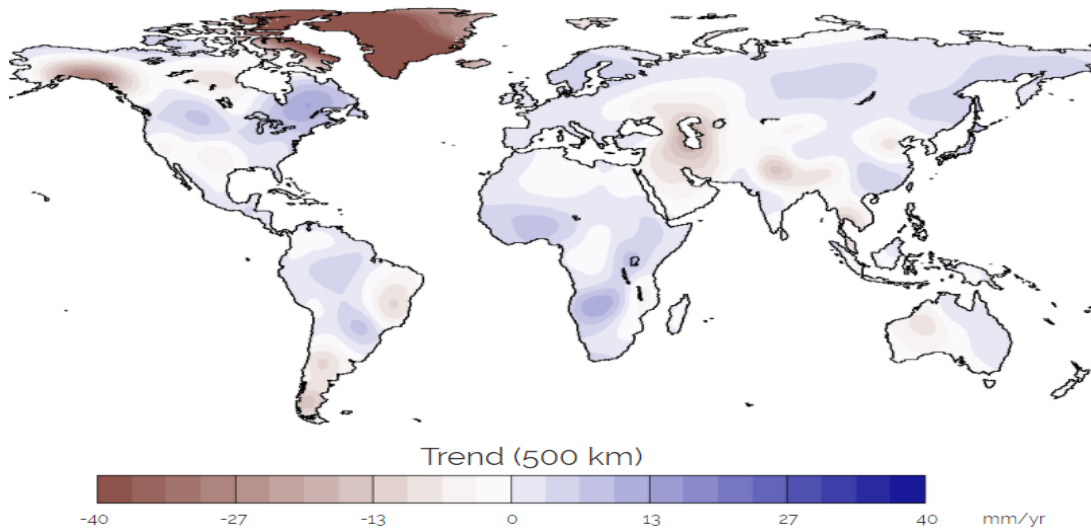
³ <https://grace.jpl.nasa.gov/>

⁴ <http://geoid.colorado.edu/grace/>

⁵ International Center for Global Earth Models-<http://icgem.gfz-potsdam.de/home>



شکل ۳-۷: روند تغییرات جرم برحسب میلی‌متر در سال با استفاده از داده‌های سطح ۲ نسخه‌ی ۵ مرکز CSR و شعاع میانگین‌گیری ۳۵۰ کیلومتر [۴۹]



شکل ۳-۸: روند تغییرات جرم برحسب میلی‌متر در سال با استفاده از داده‌های سطح ۲ نسخه‌ی ۵ مرکز CSR و شعاع میانگین‌گیری ۵۰۰ کیلومتر [۴۹]


۳-۳-۳- ضرایب هارمونیک کروی




۳-۳-۳-۱- مقدمه

میدان جاذبه‌ی جهانی به‌طور وسیع توسط توابع پایه‌ی هارمونیک کروی تا درجه معینی از قدرت تفکیک طیفی و مکانی مدلسازی می‌شود. هارمونیک‌های کروی توابعی متعامد بر روی سطح کره هستند. این توابع برای مدلسازی‌های جهانی بسیار مناسب می‌باشند و با داده‌های جهانی همگن‌سازی بیشتری

دارند. همچنین برای نمایش فرکانس‌های پایین میدان ثقل مناسب هستند [۵۰].

ضرایب هارمونیک کروی با نمادهای C_{nm} و S_{nm} نشان داده می‌شوند که n و m به ترتیب درجه^۱ و مرتبه^۲ ضرایب نام دارد. درجه و مرتبه ضرایب برای مرکز پردازش CSR، ۶۰ است. ضرایب ارائه شده در داده‌های سطح ۲ مرکز CSR، به صورت فایل‌هایی با پسوند GAC، GAD و GSM هستند. فایل‌های GSM حاوی ضرایب هارمونیک کروی می‌باشد که نشان‌دهنده‌ی میدان گرانش زمین است که اثرات سیگنال‌های جرم اقیانوسی و اتمسفری از این ضرایب حذف شده‌اند. فایل‌های GAC شامل اثرات اقیانوسی و اتمسفری جهانی و فایل‌های GAD نشان‌دهنده‌ی تغییرات فشارکف اقیانوس هستند [۷].

 [parent directory]

Name	Size	Date Modified
 GAC-2_2016346-2017006_0027_UTCSR_0000_0005.gz	100 kB	4/20/17, 7:10:00 PM
 GAD-2_2016346-2017006_0027_UTCSR_0000_0005.gz	100 kB	4/20/17, 7:11:00 PM
 GSM-2_2016346-2017006_0027_UTCSR_0060_0005.gz	47.5 kB	4/20/17, 7:10:00 PM

شکل ۳-۹: نمونه‌ای از داده‌های ماهواره‌ی ثقل‌سنجی GRACE

۳-۳-۳-۲- ضرایب درجه صفر هارمونیک کروی

از آن جایی که در مدل ژئوپتانسیلی GRACE، فرض می‌شود که جرم کلی زمین (پوسته زمین جامد و جرم سیال موجود در آن) و اتمسفر به مرور و در زمان تغییر نمی‌کند در نتیجه تغییرات مقدار ضرایب C_{00} صفر در نظر گرفته می‌شود [۳۵].

۳-۳-۳-۳- ضرایب درجه یک هارمونیک کروی

از آن جایی که سیستم مختصات طوری تعریف می‌شود که همواره مرکز آن منطبق بر مرکز جرم زمین است، ضرایب درجه یک یعنی C_{10} ، C_{11} و S_{11} صفر در نظر گرفته می‌شوند [۵۱].

¹ Degree

² Order

۳-۳-۴- ضریب درجه دو هارمونیک کروی

همان طور که قبلاً اشاره شد ماهواره‌ی ثقل‌سنجی GRACE، دارای ارتفاع مداری پایین می‌باشد و توانایی تعیین دقیق طول‌موج‌های بلند میدان ثقل را ندارد، بنابراین این ضرایب از طریق روش‌های دیگر محاسبه و در داده‌های ماهواره‌ی ثقل‌سنجی GRACE جایگزین می‌شوند. یکی از این ضرایب، ضریب C_{20} (ضریب با درجه ۲ و مرتبه‌ی صفر) است. ضریب C_{20} موجود در ضرایب هارمونیک کروی ماهواره‌ی GRACE، به دلیل فشردگی^۱ زمین است و اغلب از آن به عنوان فشردگی دینامیکی زمین نام‌برده می‌شود. نتایج نشان داده‌است که تخمین این ضریب توسط ماهواره‌ی SLR^۲، نسبت به ماهواره‌ی GRACE معتبرتر و قابل اطمینان بیشتری است [۴۸].

ماهواره‌ی SLR که از آن با عنوان فاصله‌یابی لیزری ماهواره‌ی یاد می‌شود، شامل پنج ماهواره‌ی ژئودتیکی است. از این سیستم در تعیین موقعیت مطلق نقاط استفاده می‌شود و اساس کار آن به این صورت است که یک پالس لیزری در ایستگاه زمینی تولید و از طریق یک سیستم آپتیکی به ماهواره ارسال می‌گردد. این پالس توسط رترور-رفلکتور لیزری موجود در ماهواره منعکس و دوباره توسط گیرنده‌ی موجود در ایستگاه زمینی دریافت می‌شوند. زمان سیر موج از قرائت ساعت موجود در گیرنده قابل حصول است و سرعت نور نیز مقداری مشخص دارد، با استفاده از این دو مقدار فاصله ماهواره تا ایستگاه زمینی به راحتی محاسبه می‌شود.

ضریب C_{20} بدست‌آمده از داده‌های ماهواره‌ی GRACE، از دقت خوبی برخوردار نیست. زیرا هندسه‌ی مدار ماهواره‌های ثقل‌سنجی GRACE طوری است که به این ضرایب حساسیت کمتری دارد. علاوه بر این، مؤلفه‌های جزومدی نیز ضریب C_{20} را تحت تأثیر قرار می‌دهند که از بین آن‌ها ضریب C_{20} حساسیت زیادی نسبت به مؤلفه‌های خورشیدی و خورشیدی-ماه دارد. بنابراین، مقادیر ضرایب

¹ Flattening

² Satellite Laser Ranging

ماهیهانی C_2 بدست آمده از طریق ماهواره‌های SLR، برای جایگزینی داده‌های برآوردشده‌ی ماهواره‌ی ثقل‌سنجی GRACE استفاده می‌شود [۵۲]. در این پایان‌نامه از جدیدترین داده‌های برآوردشده توسط ماهواره‌ی SLR یعنی SLR_07_C2_0 استفاده شده‌است.

۳-۴- روش از بین بردن اثرات هیدرولوژی

۳-۴-۱- مقدمه

روش‌های مختلفی توسط دانشمندان جهت حذف تأثیرات هیدرولوژی معرفی شده است. یکی از روش‌های مرسوم در حذف اثر پارامترهای هیدرولوژی در یک منطقه استفاده از مدل‌های جهانی هیدرولوژی مانند GLDAS است که با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و مشاهدات زمین‌مرجع امکان ارزیابی تغییرات پارامترهای هیدرولوژی را در مناطق خشکی در سرتاسر دنیا فراهم می‌کنند. مشکل عمده اصلی در استفاده از چنین مدل‌های هیدرولوژی، نداشتن داده در برخی از مناطق مانند تبت، گرینلند و صحرای بزرگ آفریقا به دلیل نبود ایستگاه‌های زمینی کافی، می‌باشد [۵۳].

۳-۴-۲- مدل جهانی هیدرولوژی GLDAS

مدل هیدرولوژی با نام سیستم تحلیل و شبیه‌سازی داده‌های زمینی در پوشش جهانی یا همان GLDAS، یک پروژه مشترک بین سازمان ملی هوانوردی و فضایی آمریکا (NASA)، مرکز پرواز هوایی گودارد (GSFC)^۲، مرکز اقیانوسی و اتمسفری ملی (NOAA)^۳ و مرکز ملی پیش‌بینی‌های محیطی (NCEP)^۴ است [۵].

این مدل ترکیبی از داده‌های ماهواره‌ای و مشاهدات زمین‌مرجع است که به تعیین وضعیت بهینه

¹ <ftp://podaac-ftp.jpl.nasa.gov/allData/grace/docs>

² Goddard Space Flight Center

³ National Oceanic and Atmospheric Administration

⁴ National Centers for Environmental Prediction

از سطح زمین می‌پردازد. آنچه این مدل هیدرولوژی را نسبت به سایر مدل‌ها متمایز می‌سازد جهانی بودن، قدرت تفکیک‌های زمانی و مکانی بالا و از همه مهم‌تر تطابق بالا با داده‌های ماهواره‌های ثقل‌سنجی از جمله GRACE می‌باشد. همچنین این مدل غیروابسته به اتمسفر است که از جفت مشاهدات زمینی و ماهواره‌ای برای شبیه‌سازی زمین استفاده کرده‌است. یکی از مشکلات اصلی این مدل هیدرولوژی، عدم ارائه مقادیر آب‌های زیرزمینی در آن می‌باشد؛ گرچه با ترکیب این مدل و ماهواره‌های ثقل‌سنجی مانند GRACE می‌توان تغییرات آب‌های زیرزمینی را بدست‌آورد [۵۴].

در GLDAS از مدل‌های سطح زمین (LSM)^۱ استفاده می‌شود که برای شبیه‌سازی فرآیندهای مربوط به تبادل آب و انرژی بین اتمسفر و خاک توسعه داده می‌شوند. این مدل‌های مفهومی عموماً در دسته‌ی مدل‌های توزیعی قرار گرفته و برای شبیه‌سازی بیلان آب و انرژی در مقیاس‌های مکانی بزرگ مورد استفاده قرار می‌گیرند. مدل‌های LSM با دارا بودن مؤلفه‌هایی نظیر شبیه‌ساز تبادل انرژی، هیدرولوژی، فرآیندهای بیولوژیکی و چرخه‌ی کربن قادر به ارائه‌ی تحلیل‌های مناسبی از تغییرات آب در سطح زمین می‌باشند. مدل هیدرولوژی GLDAS، دارای چهار مدل سطح زمین به نام‌های MOSAIC^۲، NOAH^۳، CLM و VIC^۴ است [۳۴].

داده‌های خروجی مدل GLDAS، در فرمتی به نام گریب (GRIB)^۵، منتشر می‌شود که توسط ارگان هواشناسی WMO^۶، در جهت افزایش قابلیت ذخیره اطلاعات هواشناسی تولید شده است و از طریق

¹ Land Surface Model

² MObility Strategy Applications In the Community

³ NOAH:

N: National Centers for Environmental Prediction (NCEP)

O: Oregon State University (Dept. of Atmospheric Sciences)

A: Air Force

H: Hydrologic Research Lab

⁴ Variable Infiltration Capacity

⁵ GRIdded Binary

⁶ World Meteorological Organization

مراکزی چون HDISC^۱ قابل دریافت هستند. از دیگر مشخصات یک فایل GLDAS می‌توان به پوشش عرض جغرافیایی از ۶۰- درجه جنوبی تا ۹۰ درجه شمالی، طول جغرافیایی از ۱۸۰- درجه غربی تا ۱۸۰ درجه شرقی، قدرت تفکیک زمانی ۳ ساعته و ماهیانه که از میانگین‌گیری از همین داده‌های ۳ ساعته تولید می‌شوند و داده‌هایی با قدرت تفکیک مکانی ۱ درجه از سال ۱۹۷۹ تا کنون و همچنین با قدرت تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه از سال ۲۰۰۰ تاکنون اشاره کرد [۵۵]. داده‌های مدل GLDAS، از سایت Giovanni^۲، قابل دریافت هستند. برای نمونه ۸ پارامتر خروجی از مدل GLDAS، در جدول زیر قرار داده شده‌است:

جدول ۳-۱: نمونه‌ای از پارامترهای خروجی مدل GLDAS

واحد	پارامتر
کیلوگرم بر مترمربع	ذوب برف (Snow melt)
متر	عمق برف (Snow depth)
پاسکال	فشار سطحی (Surface pressure)
کیلوگرم بر مترمربع	آب معادل برف (Snow water equivalent)
کیلوگرم بر مترمربع	رواناب سطحی (Surface runoff)
کیلوگرم بر مترمربع	تبخیر و تعرق کل (Total evapotranspiration)
کیلوگرم بر مترمربع	کل آب ذخیره‌شده در تاج پوشش گیاهان (Total canopy water storage)
کلوین	دمای هوا نزدیک سطح (Near surface air temperature)

لازم به ذکر است که داده‌های مدل GLDAS، در فرمت دیگری نظیر نت‌سی‌دی‌اف (NetCDF^۳)

نیز موجود است که یکی از پرکاربردترین فرمت داده در متغیرهای اقلیمی و هیدرولوژیکی محسوب شده و

^۱ Hydrology Data and Information Services Center

^۲ <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/>

^۳ Network Common Data Form

این شکل از داده توسط نرم‌افزارهایی نظیر Matlab^۱، GrADS^۲ و ncBrowse^۳ قابل بازخوانی است.

۳-۵- تغییرات جرم و رابطه‌ی آن با ضرایب هارمونیک

۳-۵-۱- مقدمه

داده‌های سطح دو ماهواره‌ی ثقل‌سنجی GRACE، یکی از محصولات این ماهواره می‌باشند که در واقع حاوی ضرایب هارمونیک‌های کروی تابع پتانسیل حداکثر تا درجه و مرتبه‌ی ۱۲۰ هستند. از کاربردهای این ضرایب می‌توان به بدست‌آوردن مدل‌های تغییرات چگالی سطحی ماهانه در مقیاس‌های جهانی اشاره کرد.

۳-۵-۲- تعیین تغییرات جرم با استفاده از ضرایب هارمونیک

برای نمایش تغییرات جرم در قالب ضخامت لایه‌ی آب معادل^۴ با استفاده از مدل‌های ماهانه‌ی ماهواره‌ی GRACE، ابتدا باید ضرایب هارمونیک کروی به تغییرات جرم بسط داده شوند و سپس بر چگالی متوسط آب تقسیم شوند. مفهوم ارتفاع آب معادل یعنی تغییر مقیاس چگالی سطحی به میزان تغییرات سطح آب بر حسب متر. تغییرات جرم بر حسب ضخامت لایه‌ی آب معادل به صورت زیر بیان می‌شود [۵۶]. برای دیدن روابط بیشتر و اثبات این روابط می‌توان به همین مرجع مراجعه شود.

$$\Delta\sigma(\varphi, \lambda) = \frac{a \rho_E}{3} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n \frac{2n+1}{1+k_n} \bar{P}_{nm}(\sin \varphi) (\Delta C_{nm} \cos(m\lambda) + \Delta S_{nm} \sin(m\lambda)) \quad 1-3$$

$$EWH = \Delta\sigma(\varphi, \lambda) / \rho_W \quad 2-3$$

در معادلات بالا φ و λ به ترتیب عرض و طول جغرافیایی، \bar{P}_{nm} توابع وابسته لژاندر از درجه‌ی n و

¹ MATrix LABoratory

² Grid Analysis and Display System

³ A Graphical netCDF File Browser

⁴ Equivalent Water Height

مرتبه m ، ΔC_{nm} و ΔS_{nm} تغییرات زمانی ضرایب هارمونیک کروی، a شعاع استوایی زمین به میزان تقریبی 6378136 متر، ρ_E چگالی متوسط زمین به میزان 5517 کیلوگرم بر مترمکعب و ρ_W چگالی متوسط آب به میزان 1027 کیلوگرم بر مترمکعب و k_n اعداد لاو از نوع دوم می‌باشد.

در معادله‌ی بالا فرض بر این است که تغییرات میدان گرانش در یک بازه‌ی کوتاه (مثلاً یک ماه)، فقط می‌تواند ناشی از تغییرات چگالی سطحی در یک لایه‌ی نازک از سطح زمین باشد. فرض دیگر اینکه فاصله‌ی همه‌ی نقاط روی سطح زمین از مرکز زمین برابر با شعاع متوسط کره زمین در نظر گرفته می‌شود. همچنین تغییرات چگالی سطحی بدست‌آمده از ماهواره‌ی GRACE، علاوه بر تغییرات مستقیم جرم سطحی، تحت تأثیر بارگذاری و تغییر شکل جرم سطحی نیز هست [۵۷].

۳-۵-۲-۱- اعداد لاو

در پژوهشی که فارل^۱ در سال ۱۹۷۲ میلادی در زمینه‌ی تغییر شکل زمین تحت بارگذاری سطحی ارائه داد، کاربرد اعداد لاو را در بارگذاری سطحی زمین، مطرح کرد. این نام‌گذاری به افتخار دانشمند معروف ادوارد لاو^۲ است که در زمینه‌ی تئوری ریاضی الاستیسیته کار می‌کرد. در حقیقت در آن تحقیق، هدف پیدا کردن ماتریسی بوده‌است که با ضرب آن در تابع پتانسیل ناشی از بارگذاری، ماتریس تغییر شکل سطح بدست‌آید. برای این منظور سه عدد لاو معرفی شده‌است [۳۲].

تعدادی از مقادیر اعداد لاو در جدول زیر آورده شده‌است. بقیه مقادیر با استفاده از درون‌یابی خطی بین این مقادیر بدست می‌آیند:

¹ Farrell

² Edward Love

جدول ۳-۲: اعداد لاو [۳۵]

k_n	n	k_n	n	k_n	n
-۰/۰۴۰	۳۰	-۰/۰۸۱	۷	+۰/۰۰۰	۰
-۰/۰۳۳	۴۰	-۰/۰۷۶	۸	+۰/۰۲۷	۱
-۰/۰۲۷	۵۰	-۰/۰۷۲	۹	-۰/۳۰۳	۲
-۰/۰۲۰	۷۰	-۰/۰۶۹	۱۰	-۰/۱۹۴	۳
-۰/۰۱۴	۱۰۰	-۰/۰۶۴	۱۲	-۰/۱۳۲	۴
-۰/۰۱۰	۱۵۰	-۰/۰۵۸	۱۵	-۰/۱۰۴	۵
-۰/۰۰۷	۲۰۰	-۰/۰۵۱	۲۰	-۰/۰۸۹	۶

۳-۵-۲-۲- توابع وابسته لژاندر

توابع لژاندر جواب معادله‌ی دیفرانسیل هارمونیک‌های کروی هستند که برای کره‌ی زمین استفاده می‌شود و به صورت زیر تعریف می‌شوند [۵۸]. برای دیدن روابط بیشتر و اثبات این روابط می‌توان به همین مرجع مراجعه شود.

$$\bar{P}_{n,n} = f_1 \cos \varphi \bar{P}_{n-1,n-1} \quad ۳-۳$$

$$\bar{P}_{n,n-1} = f_2 \sin \varphi \bar{P}_{n-1,n-1} \quad ۴-۳$$

$$\bar{P}_{n,m} = f_3 [f_4 \sin \varphi \bar{P}_{n-1,m} - f_5 \bar{P}_{n-2,m}] \quad , \quad \bar{P}_{0,0} = 1 \quad , \quad \bar{P}_{1,1} = \sqrt{3} \cos \varphi \quad ۵-۳$$

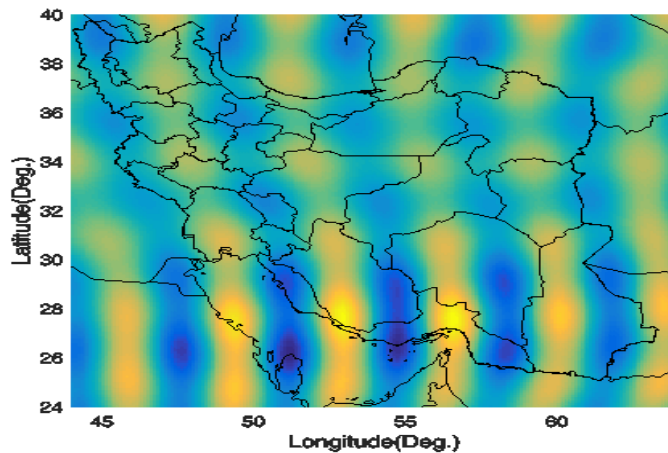
$$f_1 = \sqrt{\frac{2n+1}{2n}} \quad , \quad f_2 = \sqrt{2n+1} \quad , \quad f_3 = \sqrt{\frac{2n+1}{(n-m)(n+m)}} \quad ۶-۳$$

$$f_4 = \sqrt{2n - 1} \quad , \quad f_5 = \sqrt{\frac{(n + m - 1)(n - m - 1)}{2n - 3}}$$

۳-۶- فیلترینگ

۳-۶-۱- مقدمه

یکی از مشکلات موجود در داده‌های ماهیانه‌ی ماهواره‌ی ثقل‌سنجی GRACE وجود نویز در ضرایب هارمونیک کروی است که با افزایش درجه و مرتبه افزایش می‌یابد. وجود این نویز در مدل‌های ماهیانه‌ی GRACE سبب بوجود آمدن نوارهایی می‌شود که در راستای شمالی-جنوبی کشیده شده‌اند. علت وجود این نوارها به ساختار مدار قطبی ماهواره‌های GRACE برمی‌گردد که با زاویه‌ی میل ۸۹ درجه در حال گردش به دور زمین و جمع‌آوری داده‌های جاذبی می‌باشند. بنابراین، یکسان بودن مسیر پرواز در جهت شمالی-جنوبی، منجر به ایجاد وابستگی‌های مکانی در این راستا می‌شود. معمولاً به منظور کاهش اثر ضرایب هارمونیک کروی از درجه و مرتبه‌ی بالا و همچنین دستیابی به نتایج بهتر و دقیق‌تر از فیلترهای مختلفی برای ارزیابی تغییرات میدان ثقل زمین استفاده می‌شود [۵]. در این پایان‌نامه به منظور حذف اثر نوارشدگی از فیلتر گوسین با شعاع میانگین‌گیری ۳۵۰ کیلومتر و همچنین روش موجک، به دلیل کاربرد فراوان در تحقیقات پیشین استفاده شده‌است.



شکل ۳-۱۰: ایجاد نوارهای شمالی-جنوبی (بدون اعمال فیلتر مناسب)

۳-۶-۲- فیلتر گوسین

برای دستیابی به نتایج دقیق لازم است سهم ضرایب درجات بالای n به نحوی کاهش یابد. که بهترین روش، تعیین ضرایب وزن متناسب با درجه می باشد. این فیلتر به منزله‌ی ساده‌ترین روش پالایش داده‌های ثقلی می باشد که برای اولین بار توسط جکلی در سال ۱۹۸۱ به صورت زیر ارائه شد [۵۹].

$$W_0 = 1, \quad W_1 = \left[\frac{1 + e^{-2b}}{1 - e^{-2b}} - \frac{1}{b} \right], \quad W_{n+1} = -\frac{2n+1}{b} W_n + W_{n-1} \quad 7-3$$

$$b = \frac{\text{Ln}2}{(1 - \cos(r/a))} \quad 8-3$$

در رابطه‌ی بالا a شعاع استوایی زمین به میزان تقریبی ۶۳۷۸۱۳۶ متر و r به شعاع میانگین گیری معروف است. ناگفته نماند که این فیلتر در زمره‌ی فیلترهای پس پردازنده قرار می گیرد و به صورت آنی بر روی داده‌ها اعمال نمی شود. با توجه به روابط بالا رابطه‌ی ۳-۱ به رابطه‌ی زیر تبدیل می شود:

$$\Delta\sigma(\varphi, \lambda) = \frac{a \rho_E}{3} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n \frac{2n+1}{1+k_n} \bar{P}_{nm}(\sin \varphi) W_n(\Delta C_{nm} \cos(m\lambda) + \Delta S_{nm} \sin(m\lambda)) \quad 9-3$$

برای مطالعه‌ی دقیق تر در مناطقی نظیر کشور ایران، استفاده از روش‌های محاسباتی مناسب تر ممکن است به بهبود برآوردهای تغییرات میدان ثقل کمک کند. برخی محققین معتقدند که با بکارگیری فیلترهای مناسب، می توان به مطالعه‌ی تغییرات در ابعاد محلی تر پرداخت. با توجه به خصوصیات موجک‌های کروی استفاده از آن‌ها به منظور مطالعه‌ی تغییرات زمانی میدان ثقل، می تواند منجر به محاسبه‌ی این تغییرات در ابعاد منطقه‌ای و محلی^۱ شود [۶۰].

¹ Local

۳-۷- روش موجک

۳-۷-۱- مقدمه

موجک یک روش نوین و کارآمد در زمینه‌ی آنالیز سیگنال‌ها و سری‌های زمانی است. این توابع تبدیل ریاضی، برای تجزیه‌ی سیگنال پیوسته به مؤلفه‌های فرکانسی آن بکار می‌روند. تفاوت عمده‌ی تبدیل موجک با تبدیل فوریه در این است که فرکانس در آنالیز فوریه ثابت و دامنه متغیر می‌باشد، در حالی که در آنالیز موجک هم فرکانس و هم دامنه تغییر می‌کند. تبدیل موجک به عنوان روش جایگزین برای تبدیل فوریه‌ی زمان کوتاه ارائه شده‌است و هدف از ارائه‌ی آن غلبه بر مشکلات مربوط به قدرت تفکیک‌پذیری فرکانس در تبدیل فوریه‌ی زمان کوتاه است. تبدیل موجک، نوعی تبدیل زمان-مقیاس است. بر همین اساس با استفاده از تبدیل موجک، در مقیاس‌های بالا سیگنال منبسط‌شده و جزئیات سیگنال قابل تجزیه و تحلیل است و در مقیاس‌های پایین سیگنال منقبض‌شده و کلیات سیگنال قابل بررسی می‌باشد [۶۱].

تئوری موجک قابل استفاده در مکان‌های کوچک، که اطلاعات با فرکانس بالا مورد نیاز است و بالعکس می‌باشد. یکی از مزیت‌های موجک توانایی آنالیز محلی است به گونه‌ای که یک منطقه با سیگنال بزرگ را محلی می‌کند. همچنین، موجک یک ابزار مناسب برای فیلتر کردن سیگنال‌های محلی و بررسی اثرات تغییرات محلی و زمانی در میدان جاذبه است [۶۲].

۳-۷-۲- استفاده از موجک به عنوان یک فیلتر محلی

هارمونیک‌های کروی برای توابعی که در خارج از کره در معادله لاپلاس صدق می‌کنند کلاسی از توابع پایه ذاتی را تشکیل می‌دهند. ضرایب هارمونیک کروی که همان ضرایب تبدیل فوریه کروی هستند بهترین محلی‌سازی را در فضای فرکانس فراهم کرده ولی اطلاعات مکانی نمی‌دهند لذا از موجک استفاده می‌شود. موجک یک ابزار مناسب برای فیلتر کردن سیگنال‌های محلی و بررسی اثرات تغییرات محلی و

زمانی در میدان جاذبه است [۶۳]. موجک‌های کروی اولین بار در سال ۱۹۹۵ معرفی شدند. موجک‌های کروی برپایه‌ی بسط به چندجمله‌ای‌های لژاندر هستند. آن‌ها توابع پایه شعاعی را روی کره شکل می‌دهند به صورتی که فقط بستگی به فاصله‌ی کروی بین مرکز موجک و نقطه مورد ارزیابی دارند.

۳-۷-۳- تابع مقیاس

خانواده $\left\{ \left\{ \hat{\phi}_J(n) \right\}_{n \in N_0} \right\}_{J \in N_0}$ یک عملگر تابع مقیاس نامیده می‌شود اگر شرط‌های زیر را ارضا کند [۶۴].

۱- برای تمام $J \in N_0$:

$$\left(\hat{\phi}_J(0) \right)^2 = 1 \quad ۱۰-۳$$

۲- برای تمام $J, J' \in N_0$ با $J \leq J'$ و تمام $n \in N$:

$$0 \leq \left(\hat{\phi}_J(n) \right)^2 \leq \left(\hat{\phi}_{J'}(n) \right)^2 \quad ۱۱-۳$$

۳- برای تمام $n \in N$:

$$\lim_{J \rightarrow \infty} \left(\hat{\phi}_J(n) \right)^2 = 1 \quad ۱۲-۳$$

برای تمام ثوابت $J \in N_0$ دنباله $\left\{ \hat{\phi}_J(n) \right\}_{n \in N_0}$ تابع مقیاس ϕ_J با مقیاس J نامیده می‌شود. حال

که با توابع مقیاس آشنا شدیم، به بررسی موجک‌های مرتبط با آن پرداخته می‌شود. خانواده‌ی

به ترتیب اپراتورهای یگانه و دوگانه‌ی موجک نامیده می‌شوند اگر معادله زیر برقرار باشد [۶۲]:

$$\left\{ \left\{ \hat{\Psi}_J(n) \right\}_{n \in N_0} \right\}_{J \in N_0} \quad \text{و} \quad \left\{ \left\{ \hat{\Psi}_J(n) \right\}_{n \in N_0} \right\}_{J \in N_0}$$

$$\hat{\Psi}_J(n)\hat{\Psi}_J(n) = (\hat{\phi}_{J+1}(n))^2 - (\hat{\phi}_J(n))^2 \quad ۱۳-۳$$

موجک یگانه و دوگانه نیز همانند تابع مقیاس به صورت زیر تعریف می‌شوند [۶۲]:

$$\tilde{\Psi}_J(\xi, \eta) = \sum_{n=0}^{\infty} \hat{\Psi}_J(n) \frac{2n+1}{4\pi} P_n(\xi, \eta) \quad ۱۴-۳$$

$$\Psi_J(\xi, \eta) = \sum_{n=0}^{\infty} \hat{\Psi}_J(n) \frac{2n+1}{4\pi} P_n(\xi, \eta) \quad ۱۵-۳$$

فرض می‌کنیم که [۶۲]:

$$\Psi_J(\xi, \eta) = \sum_{n=0}^{\infty} \hat{\Psi}_J(n) \frac{2n+1}{4\pi} P_n(\xi, \eta) \quad ۱۶-۳$$

پس رابطه موجک و تابع مقیاس به صورت زیر بیان می‌شود [۶۲]:

$$\hat{\Psi}_J(n) = \sqrt{\left(\hat{\phi}_{J+1}(n)\right)^2 - \left(\hat{\phi}_J(n)\right)^2} \quad ۱۶-۳$$

در این پایان‌نامه از تابع مقیاس چندجمله‌ای مکعبی^۱ و موجک مرتبط با آن استفاده شده است. این

تابع مقیاس به صورت زیر تعریف می‌شود [۶۲]:

$$\hat{\phi}_J(n) = \begin{cases} (1-2^{-J}n)^2(1+2^{-J+1}n) & \text{for } n \in [0, 2^J) \\ 0 & \text{for } n \in [2^J, \infty) \end{cases} \quad ۱۸-۳$$

تابع مقیاس دوبشی^۲ (Dbi): این تابع مقیاس به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$a_i = h_0 s_{2i} + h_1 s_{2i+1} + h_2 s_{2i+2} + h_3 s_{2i+3} \quad ۱۹-۳$$

به همین ترتیب موجک این تابع به صورت زیر قابل تعریف است:

^۱ CUP (Cubic Polynomial)

^۲ Daubechies

$$c_i = g_0 S_{2i} + g_1 S_{2i+1} + g_2 S_{2i+2} + g_3 S_{2i+3} \quad 20-3$$

که i مرتبه این موجک بوده و در روابط فوق h_0 تا h_3 ضرایب تابع مقیاس هستند که به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$h_0 = \frac{1+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \quad h_1 = \frac{3+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \quad h_2 = \frac{3-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \quad h_3 = \frac{1-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \quad 21-3$$

و g_0 تا g_3 ضرایب ویولت این تابع مقیاس بوده که به طریق زیر معرفی می‌گردند:

$$g_0 = h_3 \quad g_1 = -h_2 \quad g_2 = h_1 \quad g_3 = -h_0 \quad 22-3$$

ابتدا به کمک روابط ماتریس مستقیم ضرایب S پیدا شده و سپس به کمک تبدیل معکوس می‌توان به تابع مقیاس و ویولت آن رسید.

۳-۸- روش انجام کار

در این پایان‌نامه برای برآورد تغییرات سالیانه‌ی سطح آب‌های زیرزمینی در کشور ایران، باتوجه به قابلیت مناسب داده‌های ماهواره‌ی GRACE در نشان‌دادن تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی، روشی که در زیر توضیح داده می‌شود، ارائه شده‌است. بدین منظور از داده‌های سطح ۲ نسخه‌ی ۵، ماهواره‌ی ثقل‌سنجی GRACE، مربوط به مرکز پردازش CSR، که شامل ضرایب نرمال شده‌ی هارمونیک‌های کروی تا درجه و مرتبه ۶۰ می‌باشد، طی دوره‌ی ماه آگوست سال ۲۰۰۲ تا ماه آگوست سال ۲۰۱۶ میلادی استفاده شده‌است. در کنار داده‌های ماهواره‌ی GRACE، از مدل هیدرولوژی GLDAS شامل مدل سطحی NOAH و به کمک سه خروجی این مدل یعنی آب معادل برف^۱، رطوبت خاک^۲ و آب ذخیره‌شده در تاج پوشش گیاهان^۳ در همان بازه‌ی زمانی استفاده شده‌است. پس به طور کلی می‌توان بیان کرد که مجموع

¹ Snow Water Equivalent

² Soil Moisture

³ Total Canopy Water Storage

تغییرات ذخایر آب بدست آمده از مدل GLDAS برابر با مجموع این سه متغیر است.

برای شروع بدین صورت عمل می‌شود که داده‌های مدل GLDAS به ضرایب هارمونیک کروی تبدیل شده تا قابل مقایسه با داده‌های ماهواره‌ی GRACE شوند. از آنجایی که این پارامترها از جنس چگالی سطحی هستند، باید بر چگالی سطحی میانگین آب تقسیم شوند تا برحسب ضخامت لایه‌ی آب معادل بیان شوند، سپس به کمک رابطه‌ی زیر به فضای گراویتی برده شده و به ضرایب هارمونیک کروی تبدیل می‌شوند [۶۵].

$$\Delta^{Gravity}(\phi, \lambda, t) = \left(\frac{1 + k_n}{2n + 1} \times \frac{3\rho_w}{a\rho_E} \right) \times \Delta^{Hydrology}(\phi, \lambda, t) \quad ۲۰-۳$$

در رابطه‌ی بالا a شعاع استوایی زمین به میزان تقریبی ۶۳۷۸۱۳۶ متر، ρ_E چگالی متوسط زمین به میزان ۵۵۱۷ کیلوگرم بر مترمکعب، ρ_w چگالی متوسط آب به میزان ۱۰۲۷ کیلوگرم بر مترمکعب، ϕ و λ به ترتیب عرض و طول جغرافیایی و n درجه در بسط به هارمونیک‌های کروی هستند. در پایان بعد از تبدیل داده‌های مدل GLDAS به ضرایب هارمونیک کروی، این ضرایب مطابق با فرمول زیر از ضرایب داده‌های گریس کم می‌شوند.

$$\Delta GW = \Delta TWS - (\Delta SWE + \Delta SM + \Delta TCW) \quad ۲۱-۳$$

در رابطه‌ی بالا در سمت چپ تساوی، میزان تغییرات آب‌های زیرزمینی (ΔGW) قرار گرفته و در سمت راست تساوی به ترتیب از چپ به راست میزان تغییرات کل ذخایر آب (TWS) برآورد شده توسط ماهواره‌ی GRACE، تغییرات آب معادل برف (SWE)، تغییرات رطوبت خاک (SM) و تغییرات کل آب موجود در تاج پوشش گیاهان (TCW) در مدل هیدرولوژی GLDAS قرار گرفته‌اند. لازم به ذکر است، برای محاسبه‌ی تغییرات آب‌های زیرزمینی به صورت سالانه، خروجی‌های مدل GLDAS به صورت سالانه

¹ GroundWater

با هم جمع می‌شوند و سپس به ضرایب هارمونیک کروی تبدیل می‌شوند و در خصوص داده‌های ماهواره‌ی GRACE که به صورت ماهانه هستند، روش انجام کار به این صورت است که یک میانگین‌گیری سالانه بر روی داده‌ها انجام می‌شود تا این ضرایب به صورت سالانه بدست آیند. همچنین برای از بین بردن خطای موجود در داده‌های ماهواره‌ی ثقل‌سنجی GRACE از فیلتر گوسین با شعاع میانگین‌گیری ۳۵۰ کیلومتر و موجک کروی پلی‌نومیال (CUP) و موجک Db4 استفاده شده‌است.

در هر سفره‌ی آب‌زیرزمینی تعدادی چاه پیزومتری وجود دارد که به صورت ماهانه ارتفاع سطح آب‌زیرزمینی در این چاه‌ها اندازه‌گیری می‌شود و با میانگین‌گیری از این چاه‌های پیزومتری، می‌توان ارتفاع سطح آب در سفره‌ی آب‌زیرزمینی را بدست آورد. بنابراین در آخر برای صحت‌سنجی نتایج حاصل از ماهواره‌ی GRACE و مدل GLDAS، از داده‌های ماهانه‌ی چاه‌های پیزومتری دو استان خراسان رضوی و خراسان جنوبی، که از شرکت مدیریت منابع آب ایران (تهران) تهیه شدند، استفاده می‌شود.

۴- فصل چہارم

نتایج و بحث

۴-۱- مقدمه

در این پایان‌نامه از ۱۵۴ ماه داده‌ی ماهواره‌ی ثقل‌سنجی GRACE، طی دوره‌ی آگوست ۲۰۰۲ تا آگوست ۲۰۱۶ در کنار مدل هیدرولوژی GLDAS و به کمک سه خروجی این مدل یعنی آب معادل برف، رطوبت خاک و آب ذخیره‌شده در تاج پوشش گیاهان در همان بازه‌ی زمانی برای برآورد تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی به صورت سالانه در کشور ایران استفاده شده‌است. محدوده‌ی زمانی داده‌های سطح ۲ نسخه‌ی ۵ که از مرکز پردازش CSR دریافت شده‌است به صورت جدول ۴-۱ است. لازم به ذکر است به دلایل مختلفی از جمله از دست رفتن داده‌های شتاب‌سنج، برخی از ماه‌ها برای مرکز CSR فاقد داده می‌باشد.

جدول ۴-۱: محدوده‌ی زمانی داده‌های سطح ۲ نسخه‌ی ۵ ماهواره‌ی GRACE برای مرکز پردازش CSR

CSR	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
2002								✓	✓	✓	✓	✓
2003	✓	✓	✓	✓	✓	*	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2004	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2005	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2006	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2007	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2008	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2009	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2010	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2011	*	✓	✓	✓	✓	*	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2012	✓	✓	✓	✓	*	✓	✓	✓	✓	*	✓	✓
2013	✓	✓	*	✓	✓	✓	✓	*	*	✓	✓	✓
2014	✓	*	✓	✓	✓	✓	*	✓	✓	✓	✓	*
2015	✓	✓	✓	✓	✓	*	✓	✓	✓	*	*	✓
2016	✓	✓	✓	*	✓	✓	✓	✓				

۴-۲- محدوده‌ی مطالعاتی

کشور ایران با وسعت ۱۶۴۸۱۹۵ کیلومتر مربع و عرض جغرافیایی ۲۴ تا ۴۰ درجه‌ی شمالی و طول جغرافیایی ۴۴ تا ۶۴ درجه شرقی به عنوان منطقه‌ی مورد مطالعه در این پایان‌نامه انتخاب شده‌است. کشور ایران از نظر محدوده‌های آبریز به ۶ حوضه‌ی آبریز اصلی تقسیم می‌شود که عبارتند از:

- حوضه‌ی آبریز دریای مازندران

- حوضه‌ی آبریز قره‌قوم

- حوضه‌ی آبریز مرزی شرق

- حوضه‌ی آبریز دریای عمان و خلیج فارس

- حوضه‌ی آبریز فلات مرکزی

- حوضه‌ی آبریز دریاچه ارومیه

همچنین برای صحت‌سنجی نتایج، از چاه‌های پیزومتری واقع در دو استان خراسان رضوی و

خراسان جنوبی استفاده شد.



شکل ۳-۱۱: نحوه‌ی توزیع چاه‌های پیزومتری در دو استان خراسان رضوی و خراسان جنوبی

۴-۳- نتایج

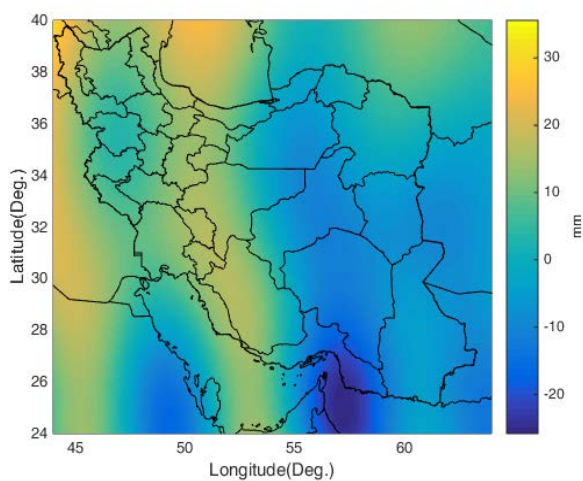
در فصل گذشته مبانی مربوط به ماهواره‌ی ثقل‌سنجی GRACE، مدل هیدرولوژی GLDAS و

همچنین داده‌های مورد استفاده در این تحقیق شرح داده شد. در این فصل به نتایج عددی بدست‌آمده،

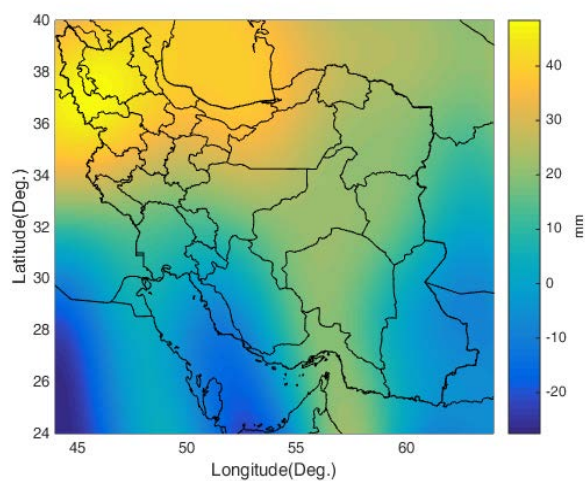
برای تخمین تغییرات آب‌های زیرزمینی در کشور ایران پرداخته می‌شود. خطای نوارشدگی ماهواره‌ی GRACE، به کمک فیلترگوسین با شعاع میانگین‌گیری ۳۵۰ کیلومتر، موجک CUP و موجک Db4 برطرف شده‌است.

۴-۳-۱- نتایج تغییرات سالانه‌ی آب‌های زیرزمینی به کمک فیلتر گوسین

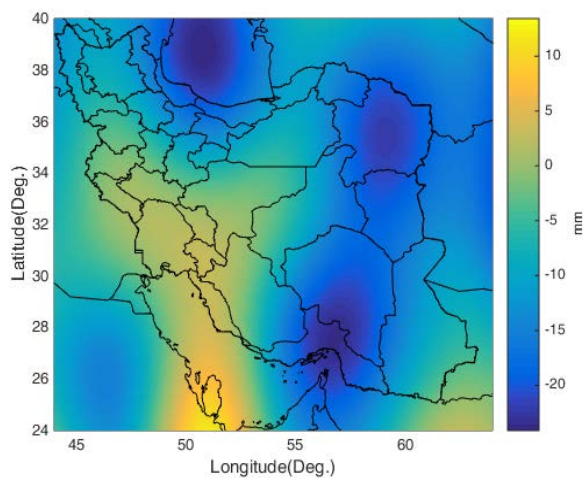
شکل‌های زیر تغییرات آب‌های زیرزمینی را بین سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۶ میلادی به کمک فیلتر گوسین با شعاع میانگین‌گیری ۳۵۰ کیلومتر در ایران نشان می‌دهند.



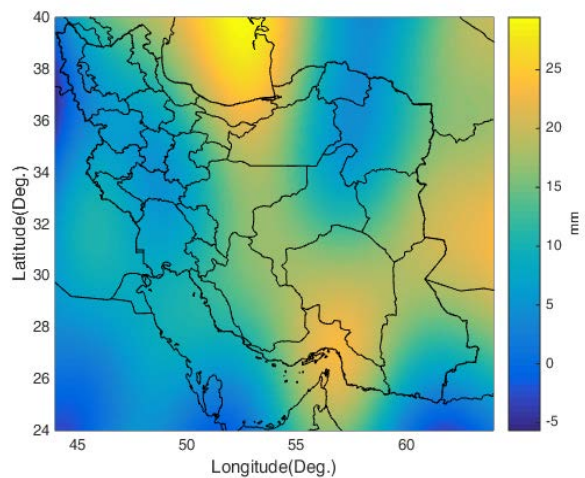
شکل ۴-۱-ب: سال ۲۰۰۳-۲۰۰۴



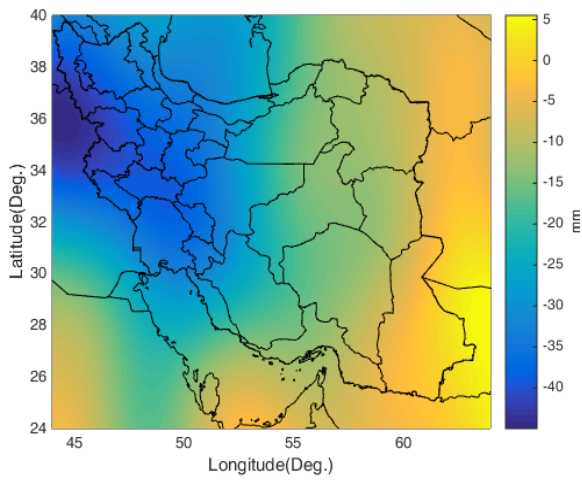
شکل ۴-۱-الف: سال ۲۰۰۲-۲۰۰۳



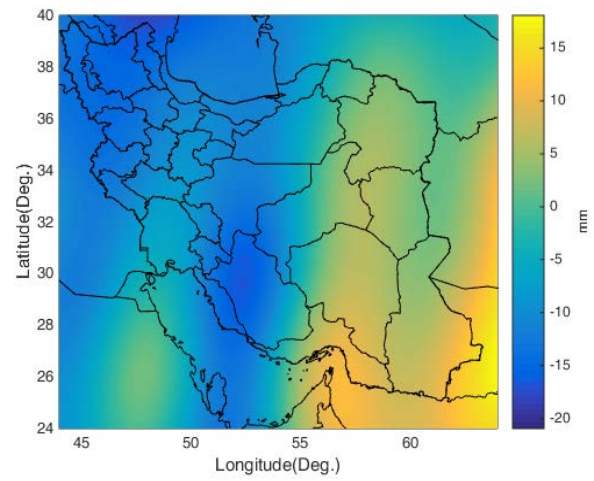
شکل ۴-۱-ت: سال ۲۰۰۵-۲۰۰۶



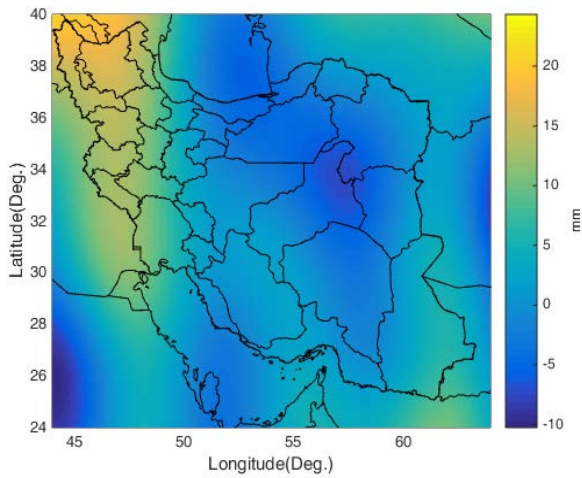
شکل ۴-۱-پ: سال ۲۰۰۴-۲۰۰۵



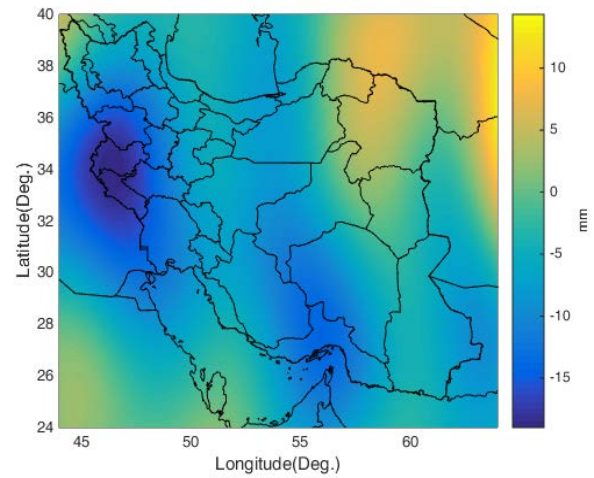
شکل ۴-۱-ج: سال ۲۰۰۸-۲۰۰۷



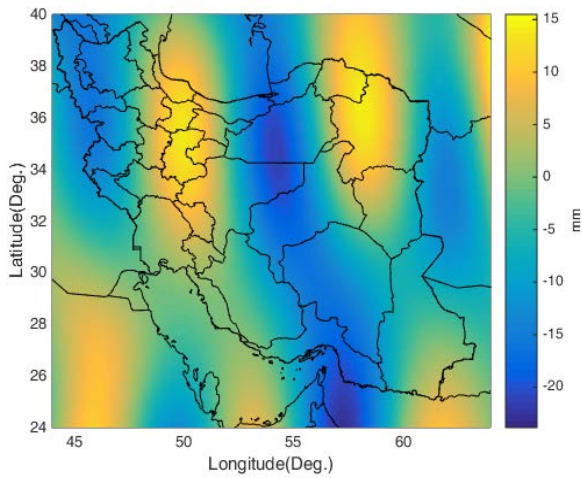
شکل ۴-۱-ث: سال ۲۰۰۷-۲۰۰۶



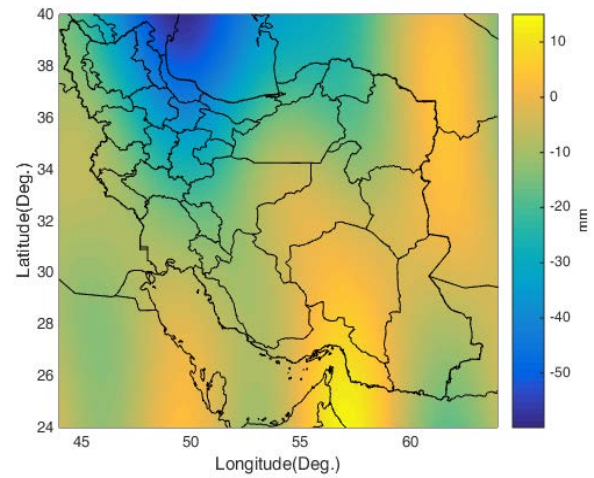
شکل ۴-۱-ح: سال ۲۰۱۰-۲۰۰۹



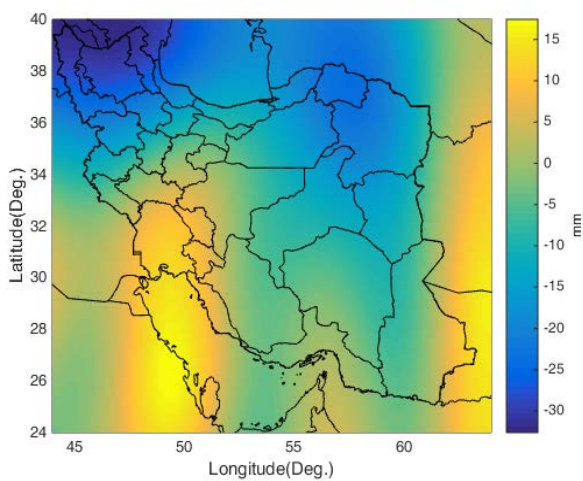
شکل ۴-۱-چ: سال ۲۰۰۹-۲۰۰۸



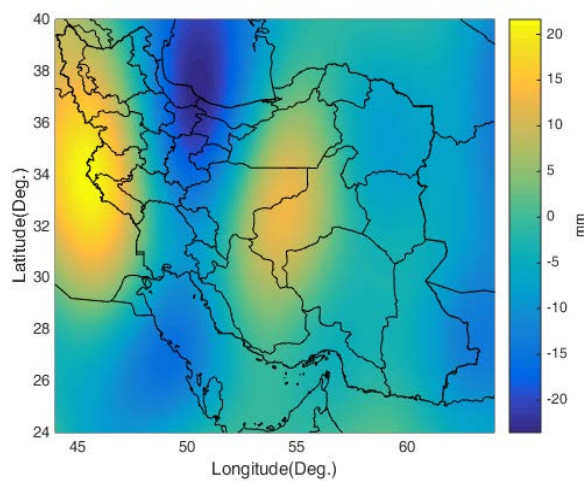
شکل ۴-۱-د: سال ۲۰۱۲-۲۰۱۱



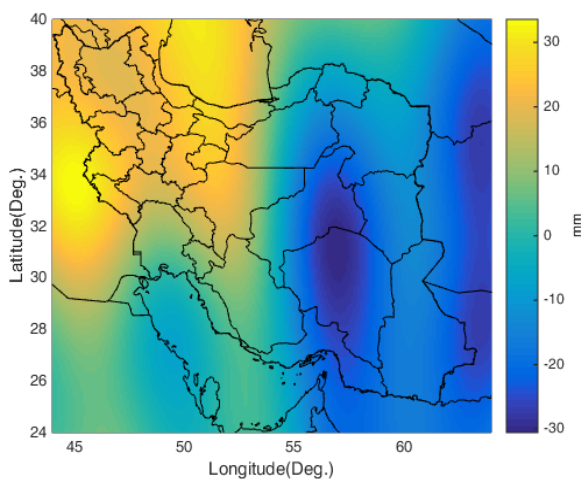
شکل ۴-۱-خ: سال ۲۰۱۱-۲۰۱۰



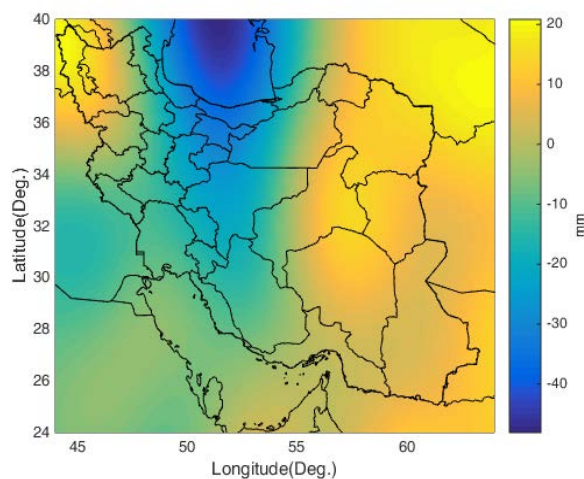
شکل ۴-۱- ز: سال ۲۰۱۳-۲۰۱۴



شکل ۴-۱- ذ: سال ۲۰۱۲-۲۰۱۳



شکل ۴-۱- ژ: سال ۲۰۱۵-۲۰۱۶

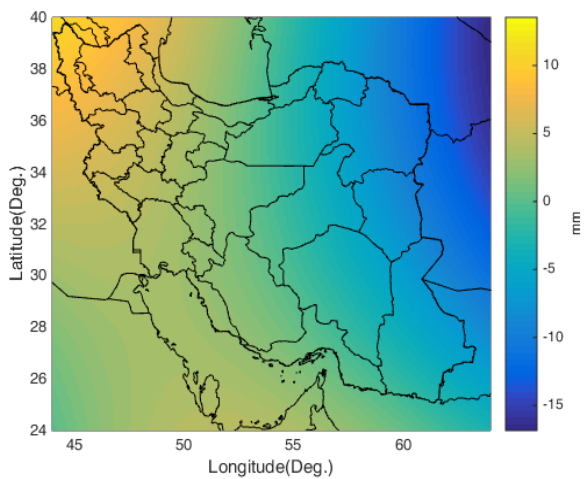


شکل ۴-۱- ز: سال ۲۰۱۴-۲۰۱۵

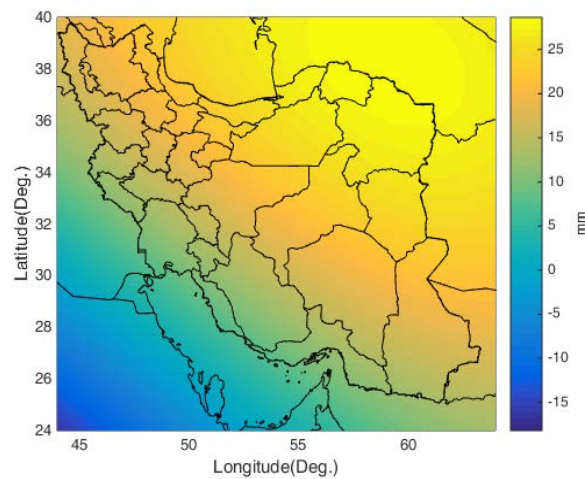
۴-۳-۲- نتایج تغییرات سالانه‌ی آب‌های زیرزمینی به کمک موجک Db4

شکل‌های زیر روند تغییرات آب‌های زیرزمینی، طی سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۶ میلادی به کمک

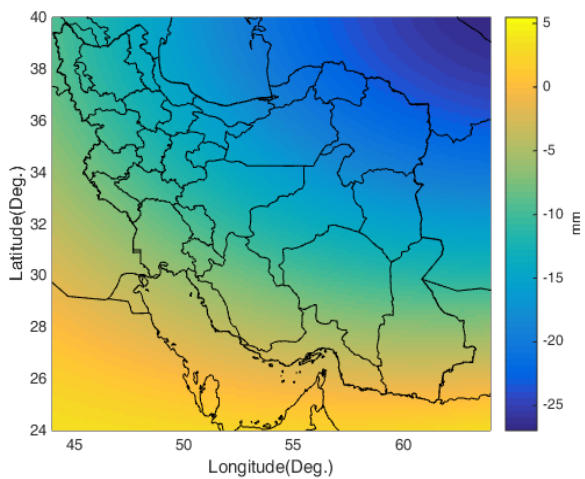
موجک Db4 را در کشور ایران نشان می‌دهند.



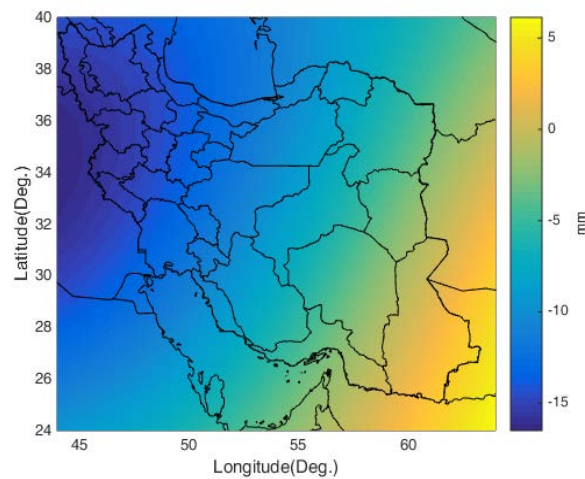
شکل ۲-۴ ب: سال ۲۰۰۳-۲۰۰۴



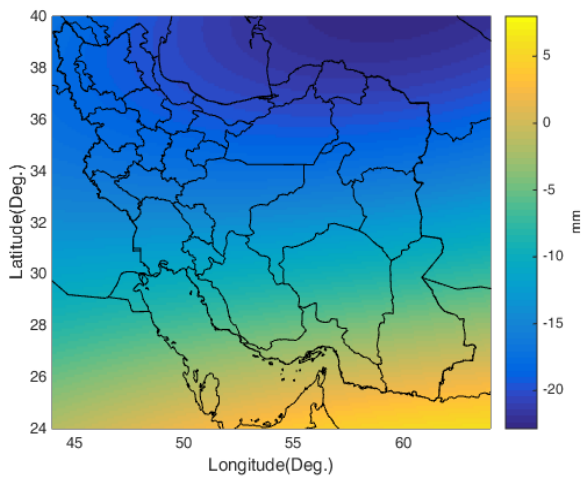
شکل ۲-۴ الف: سال ۲۰۰۲-۲۰۰۳



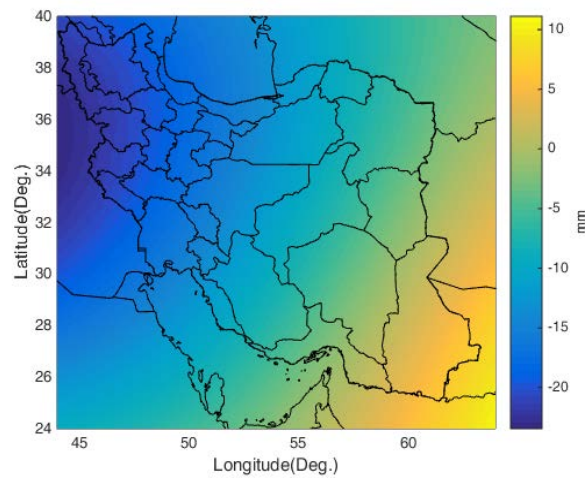
شکل ۲-۴ ت: سال ۲۰۰۵-۲۰۰۶



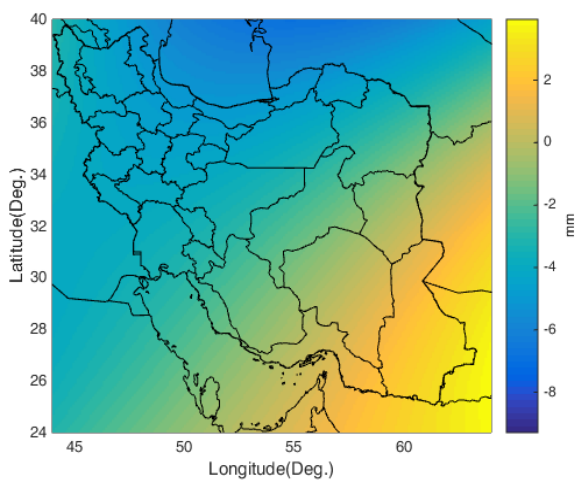
شکل ۲-۴ پ: سال ۲۰۰۴-۲۰۰۵



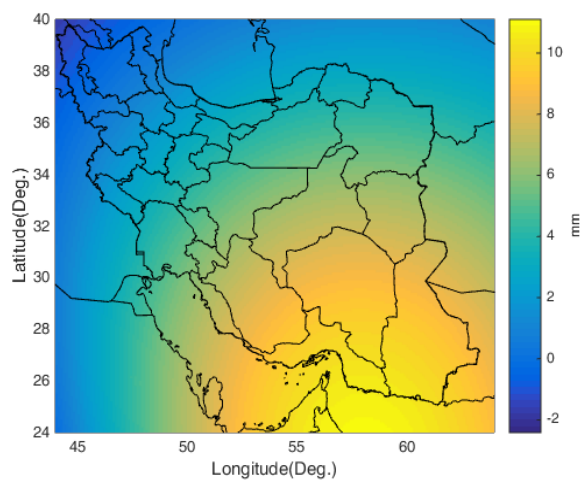
شکل ۲-۴ ج: سال ۲۰۰۷-۲۰۰۸



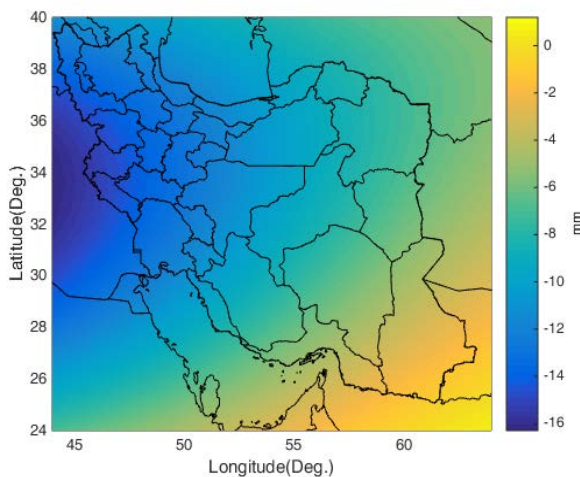
شکل ۲-۴ ث: سال ۲۰۰۶-۲۰۰۷



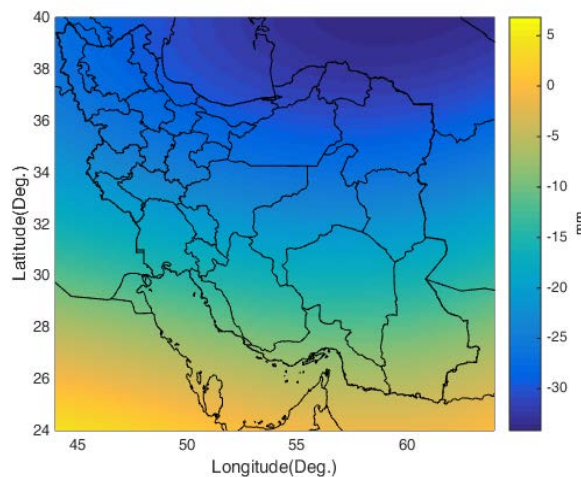
شکل ۲-۴-ح: سال ۲۰۰۹-۲۰۱۰



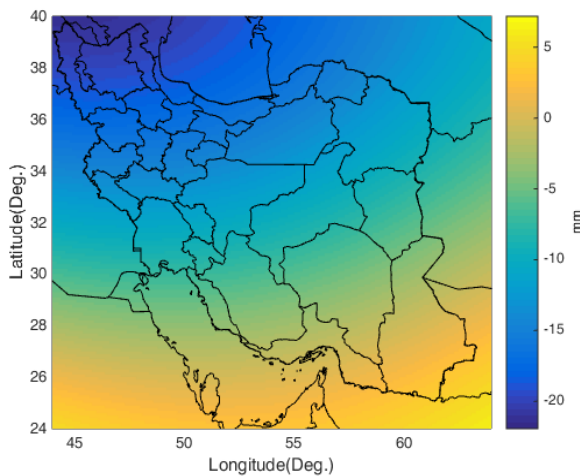
شکل ۲-۴-چ: سال ۲۰۰۸-۲۰۰۹



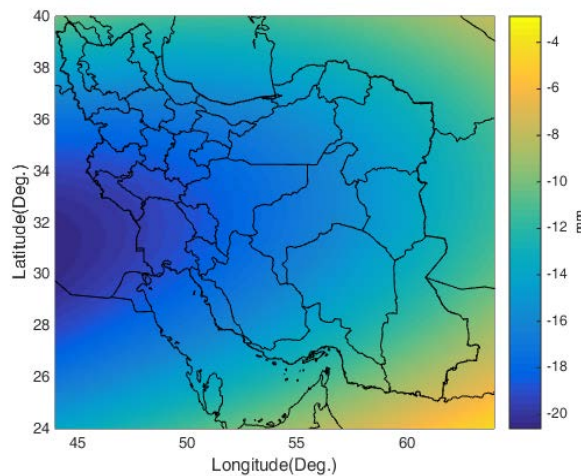
شکل ۲-۴-د: سال ۲۰۱۱-۲۰۱۲



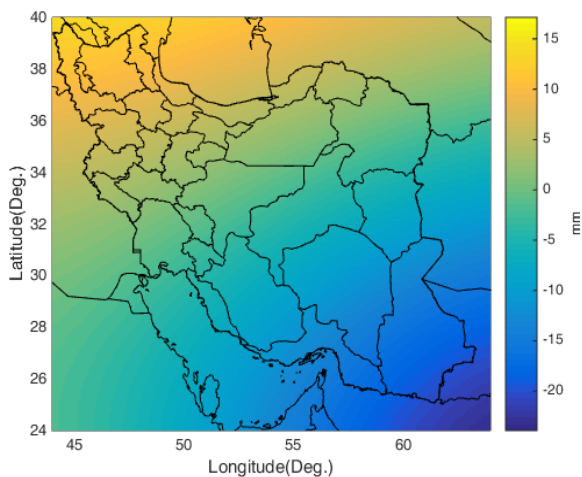
شکل ۲-۴-خ: سال ۲۰۱۰-۲۰۱۱



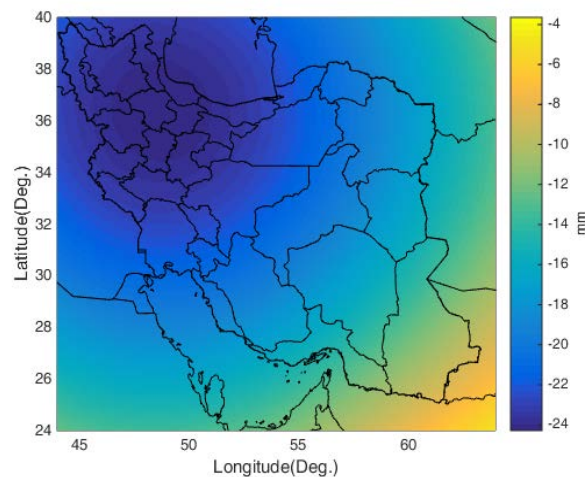
شکل ۲-۴-ر: سال ۲۰۱۳-۲۰۱۴



شکل ۲-۴-ز: سال ۲۰۱۲-۲۰۱۳



شکل ۲-۴- ز: سال ۲۰۱۵-۲۰۱۶

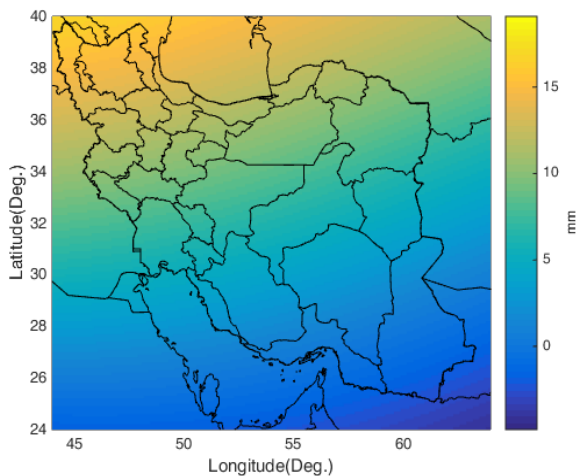


شکل ۲-۴- ز: سال ۲۰۱۴-۲۰۱۵

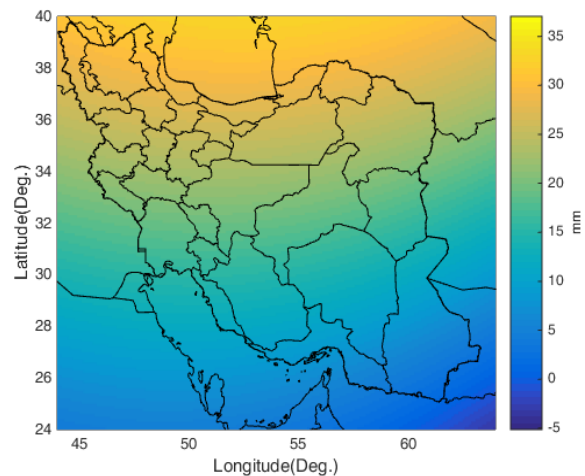
۳-۳-۴- نتایج تغییرات سالانه آب‌های زیرزمینی به کمک موجک CUP

شکل‌های زیر روند تغییرات آب‌های زیرزمینی، طی دوره مطالعاتی از سال ۲۰۰۲ تا سال ۲۰۱۶

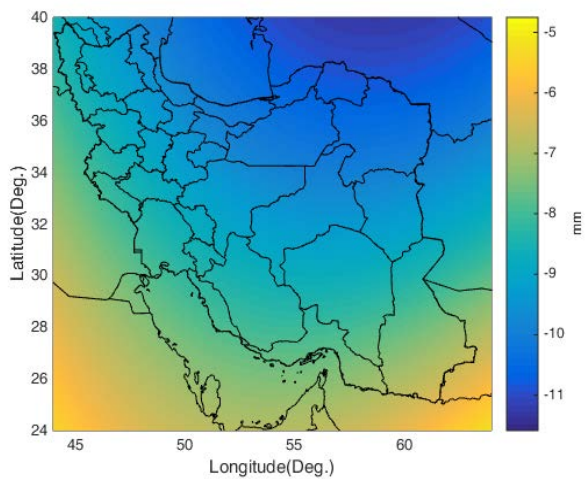
میلادی را به کمک موجک CUP در کشور ایران نشان می‌دهند.



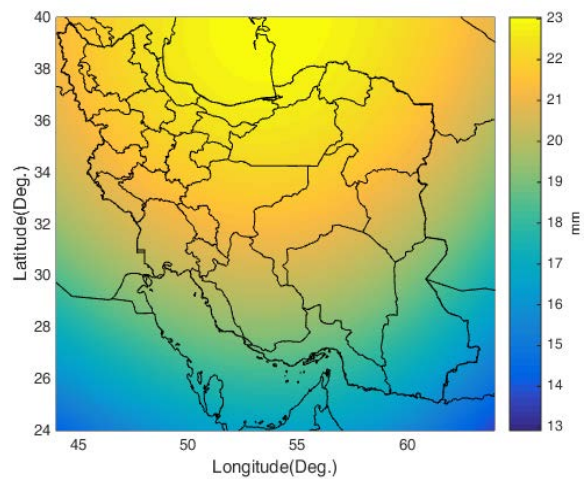
شکل ۳-۴- ب: سال ۲۰۰۳-۲۰۰۴



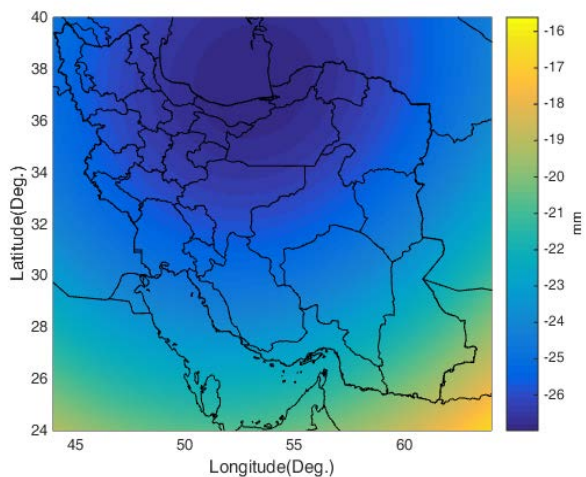
شکل ۳-۴- الف: سال ۲۰۰۲-۲۰۰۳



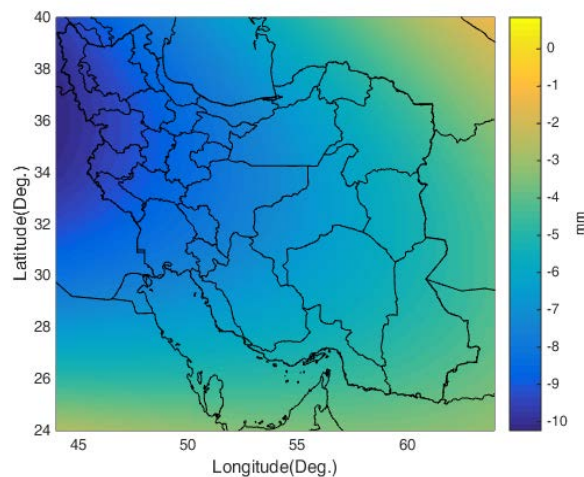
شکل ۳-۴- ت: سال ۲۰۰۵-۲۰۰۶



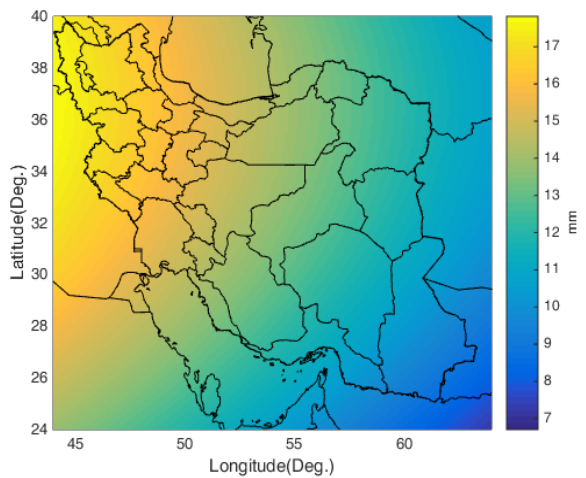
شکل ۳-۴- پ: سال ۲۰۰۴-۲۰۰۵



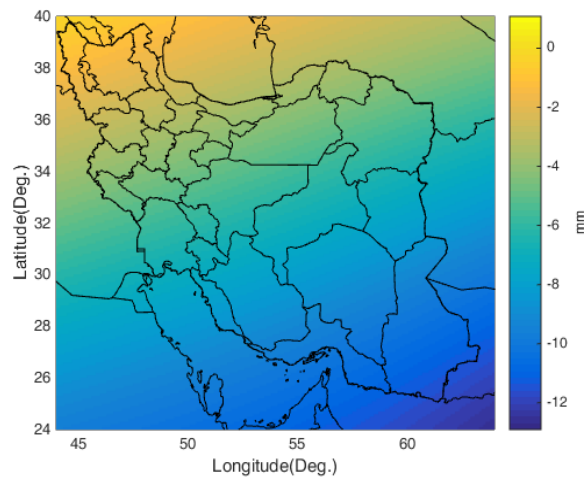
شکل ۳-۴- ج: سال ۲۰۰۷-۲۰۰۸



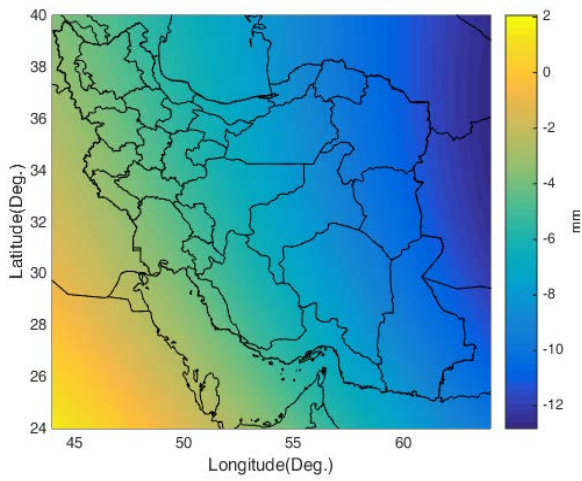
شکل ۳-۴- ث: سال ۲۰۰۶-۲۰۰۷



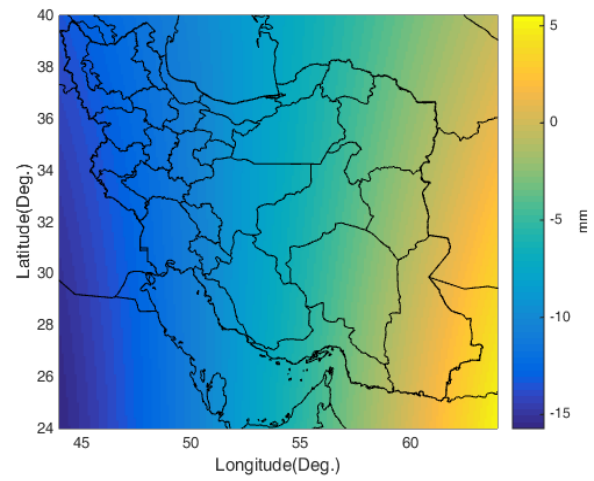
شکل ۳-۴- ح: سال ۲۰۰۹-۲۰۱۰



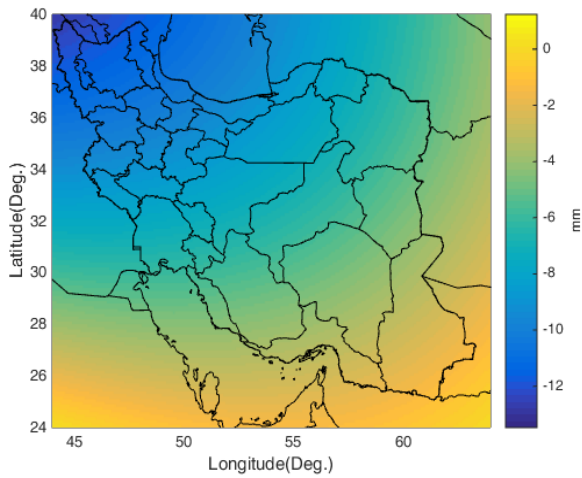
شکل ۳-۴- چ: سال ۲۰۰۸-۲۰۰۹



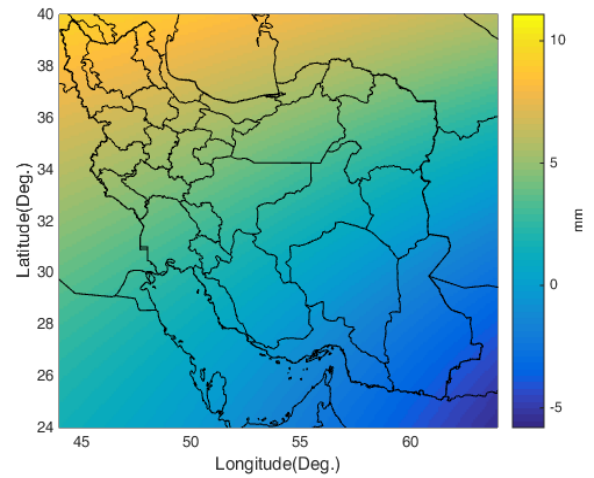
شکل ۳-۴- د: سال ۲۰۱۱-۲۰۱۲



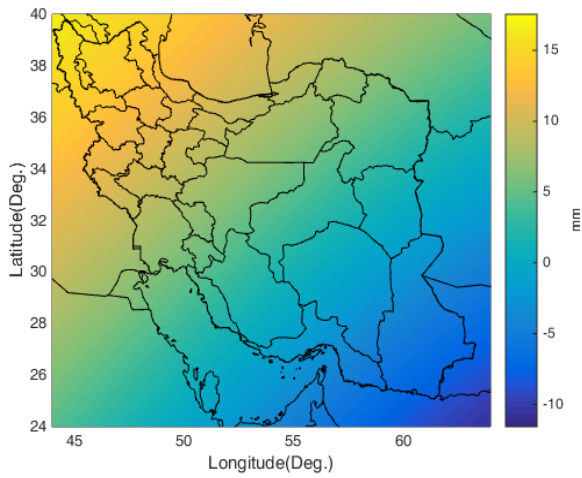
شکل ۳-۴- خ: سال ۲۰۱۰-۲۰۱۱



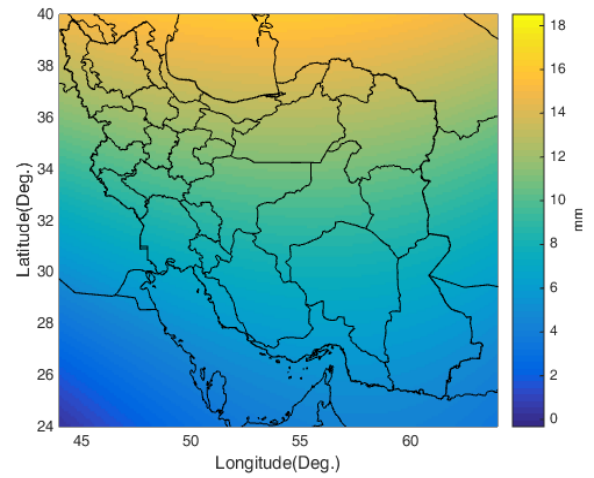
شکل ۳-۴- ر: سال ۲۰۱۳-۲۰۱۴



شکل ۳-۴- ذ: سال ۲۰۱۲-۲۰۱۳



شکل ۳-۴- ز: سال ۲۰۱۵-۲۰۱۶

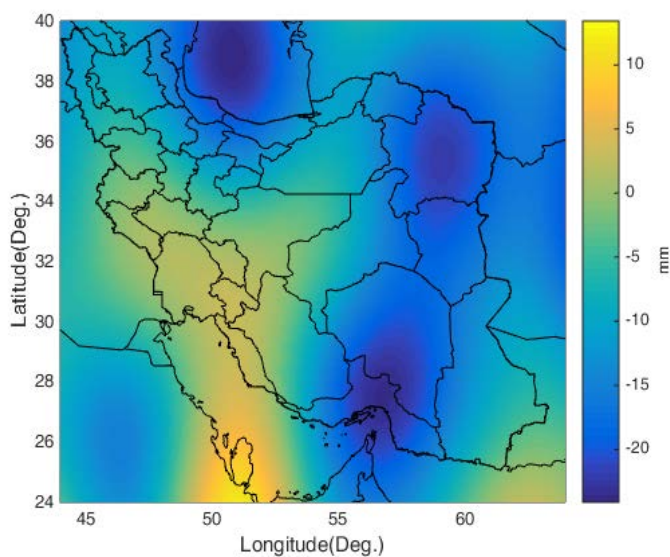


شکل ۳-۴- ز: سال ۲۰۱۴-۲۰۱۵

لازم به ذکر است که با توجه به سایر تحقیقات مشابه [۸]، اعداد بدست آمده منطقی می‌باشند و اختلاف بین مقادیر این پایان‌نامه و آن‌ها ناشی از انتخاب روش متفاوت و استفاده از فیلتر گوسین با شعاع میانگین‌گیری متفاوت در ارزیابی آب‌های زیرزمینی در کشور ایران است. همچنین تحقیقات زیاد دیگری از جمله جین و همکاران در سال ۲۰۱۳ میلادی [۶۶] و مونتسینو و همکاران در سال ۲۰۱۶ میلادی [۶۷] در مناطق دیگر انجام گرفته‌است که تغییرات آب‌های زیرزمینی را بر حسب میلی‌متر در سال محاسبه کرده‌اند.

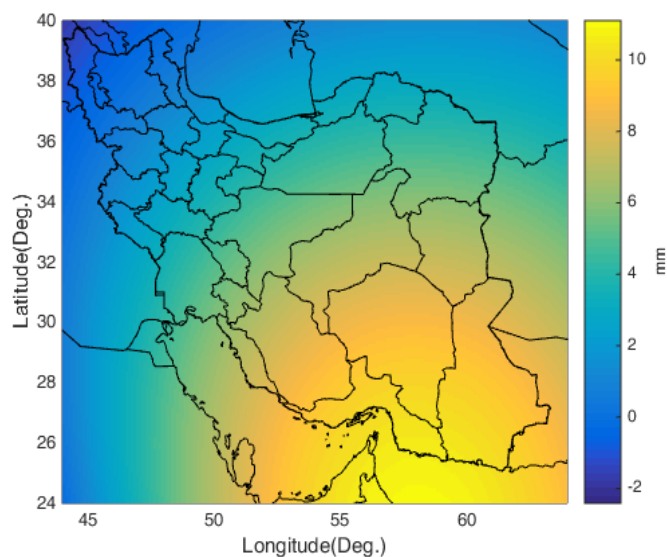
۴-۴- تفسیر نتایج سالانه‌ی تغییرات آب‌های زیرزمینی در کشور ایران

به دلیل تعداد زیاد خروجی‌های حاصل که به کمک سه فیلتر گوسین با شعاع میانگین‌گیری ۳۵۰ کیلومتر، موجک CUP و موجک Db4 حاصل شده‌اند، برای نمونه سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۶ میلادی از روش فیلتر گوسین با شعاع میانگین‌گیری ۳۵۰ کیلومتر، سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۰۹ میلادی برای روش موجک Db4 و سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۴ میلادی برای روش موجک CUP، به نمایندگی از این روش‌ها انتخاب شده‌اند و به تفسیر این خروجی‌های پرداخته شده‌است.



شکل ۴-۴: تغییرات آب‌های زیرزمینی به کمک فیلتر گوسین طی سال ۲۰۰۵-۲۰۰۶

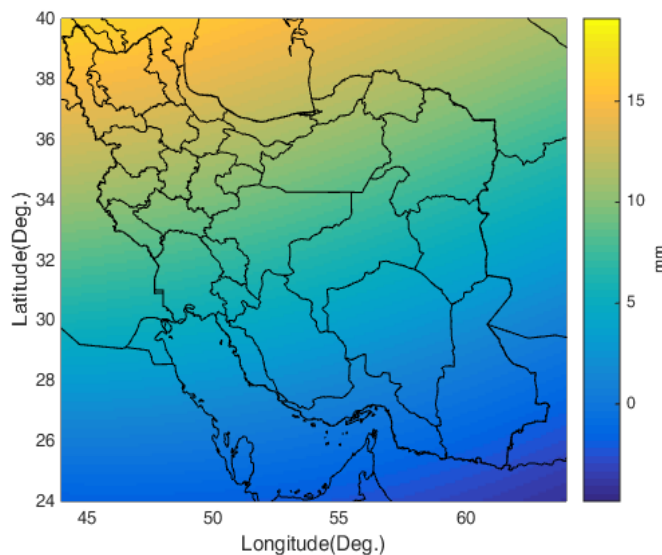
همان‌طور که از شکل مشخص است، رنگ آبی نشان‌دهنده‌ی کاهش سطح تغییرات آب‌یرزمینی و رنگ زرد نشان‌دهنده‌ی افزایش این تغییرات است. باتوجه به شکل تقریباً در نواحی شرقی و شمالی ایران و بخصوص در استان خراسان رضوی و مرز دو استان کرمان و هرمزگان کاهش تغییرات آب‌های زیرزمینی نسبت به مکان‌های دیگر بیشتر است. حداقل این تغییرات حدوداً به میزان ۳۰ میلی‌متر و حداکثر این تغییرات برابر با ۱۵ میلی‌متر است.



شکل ۴-۵: تغییرات آب‌های زیرزمینی به کمک موجک Db4 طی سال ۲۰۰۸-۲۰۰۹

همان‌طور که از شکل بالا مشخص است در طی سال ۲۰۰۸ تا سال ۲۰۰۹ میلادی تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی در نواحی جنوب و جنوب‌شرق ایران روند افزایشی داشته‌است که حداکثر این تغییرات در نواحی جنوبی ایران تقریباً برابر با ۱۰ میلی‌متر مشاهده شده‌است. همچنین کاهشی حداکثری در حدود ۲ میلی‌متر در نواحی غرب و شمال‌غرب و بویژه در مناطق شمال‌غرب ایران اتفاق افتاده‌است. با توجه به شکل زیر مشخص است که در نواحی شمالی ایران و حاشیه‌ی دریای خزر افزایش تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی به میزان حداکثر ۲۰ میلی‌متر اتفاق افتاده‌است. همچنین در مناطق

جنوبی ایران کاهشی در حدود ۵ میلی متر را شاهد هستیم.

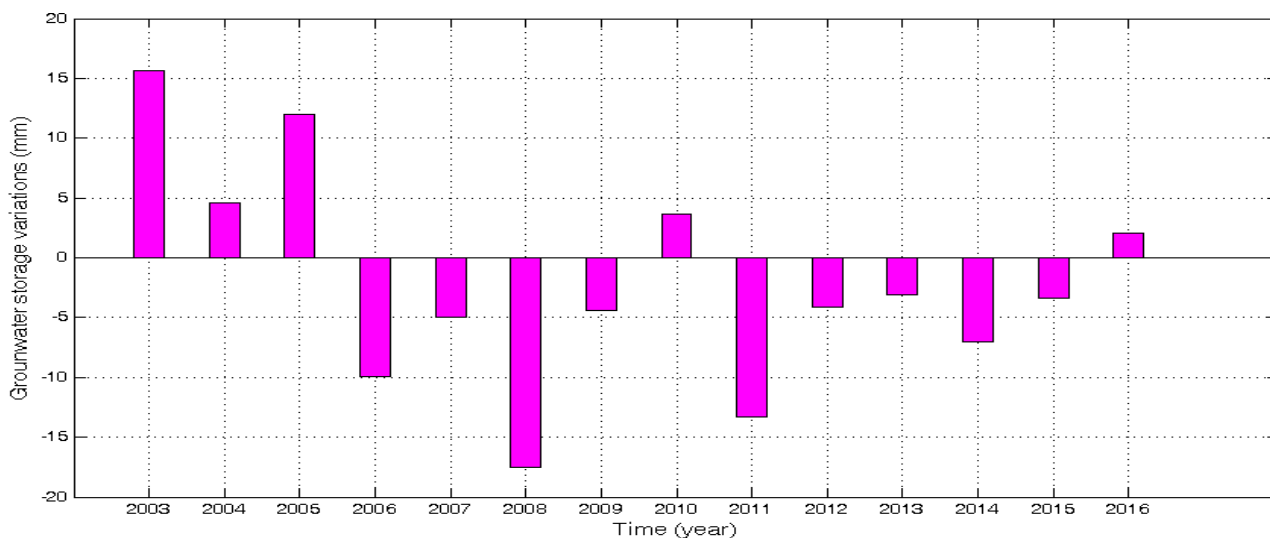


شکل ۴-۶: تغییرات آب‌های زیرزمینی به کمک موجک CUP طی سال ۲۰۰۳-۲۰۰۴

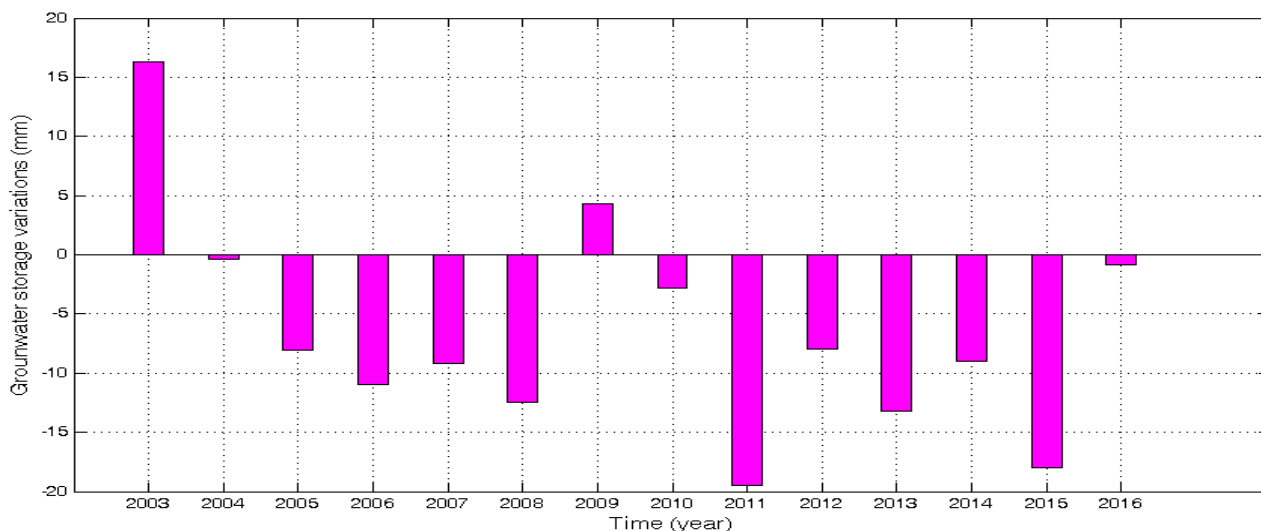
برای اینکه یک آنالیز کلی از تغییرات آب‌های زیرزمینی در کشور ایران انجام دهیم. مجموع کل

این تغییرات را روی کل کشور ایران بدست آورده و به صورت سالیانه از سال ۲۰۰۲ تا سال ۲۰۱۶ میلادی

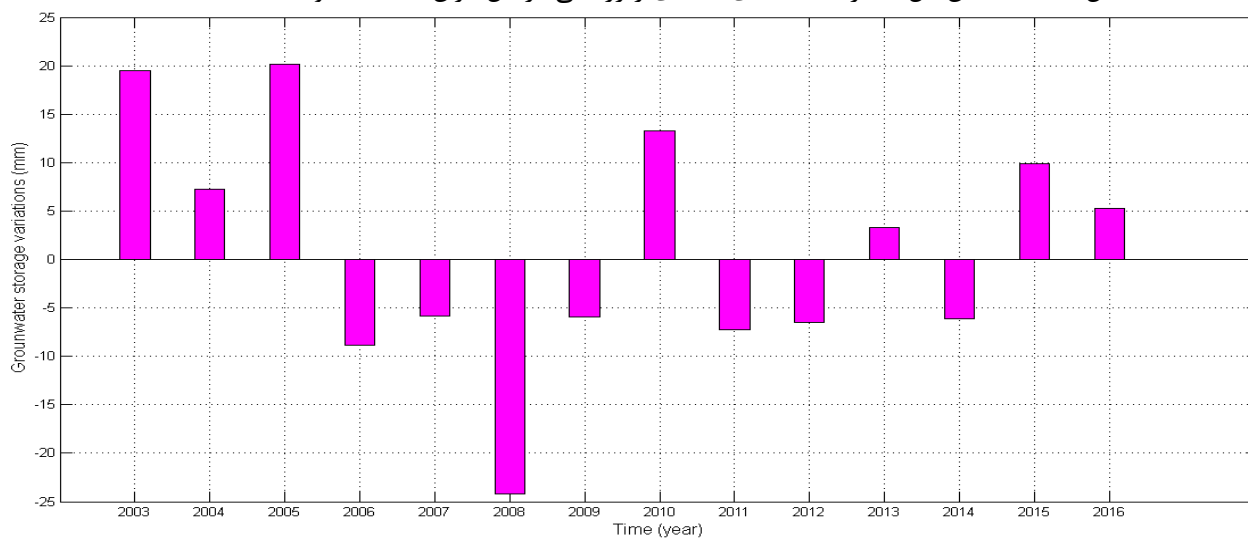
در نمودارهای میله‌ای محاسبه کردیم و به صورت زیر نمایش داده‌ایم.



شکل ۴-۷: میانگین کل تغییرات سالیانه‌ی آب‌های زیرزمینی در کل ایران به کمک فیلتر گوسین



شکل ۴-۸: میانگین کل تغییرات سالانه‌ی آب‌های زیرزمینی در کل ایران به کمک موجک Db4



شکل ۴-۹: میانگین کل تغییرات سالانه‌ی آب‌های زیرزمینی در کل ایران به کمک موجک CUP

همچنین برای اینکه مشاهده شود که به‌طور کلی از ابتدای سال ۲۰۰۲ تا سال ۲۰۱۶ میلادی

تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی روند افزایشی یا کاهشی داشته است، سال ۲۰۰۲ میلادی به عنوان سال

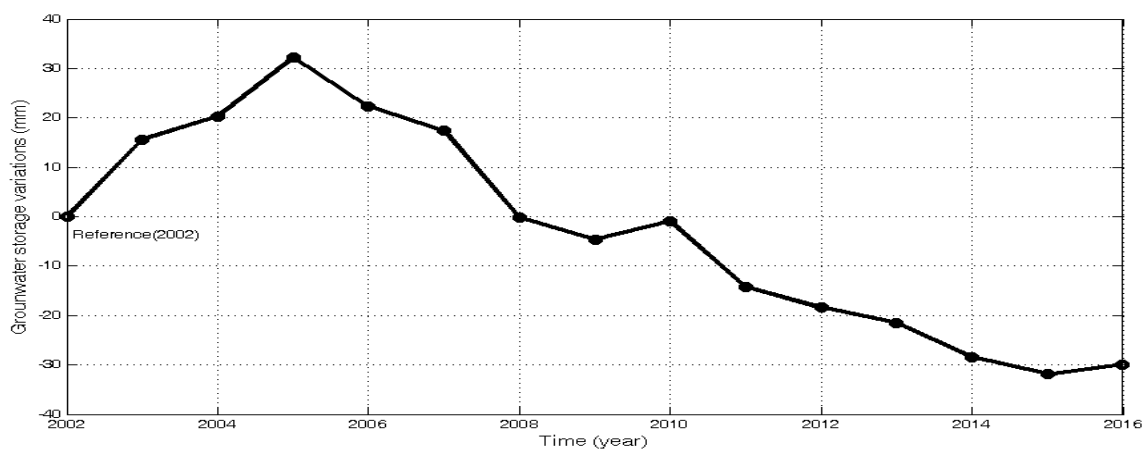
مرجع انتخاب شده و تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی در سال‌های آینده نسبت به سال ۲۰۰۲ به صورت

یک سری زمانی بدست آورده شده است. بدین ترتیب به منظور فهم بهتر روند افزایشی یا کاهشی بودن سطح

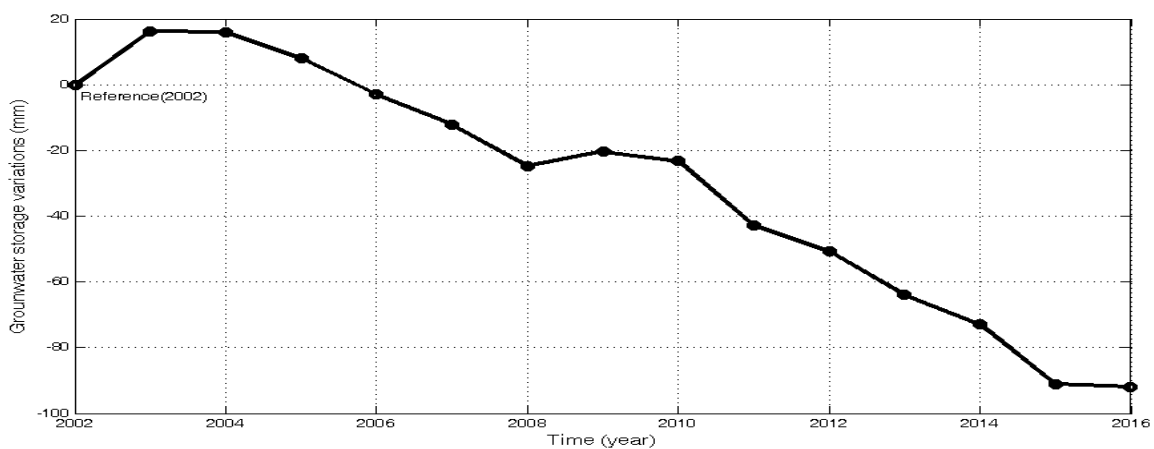
تغییرات آب‌های زیرزمینی و مدیریت بهینه‌ی این منابع که از مهم‌ترین منابع آبی در دسترس در کشور

ایران به حساب می‌آیند، یک آنالیز دقیق انجام شده است. سری‌های زمانی انجام شده در شکل‌های زیر

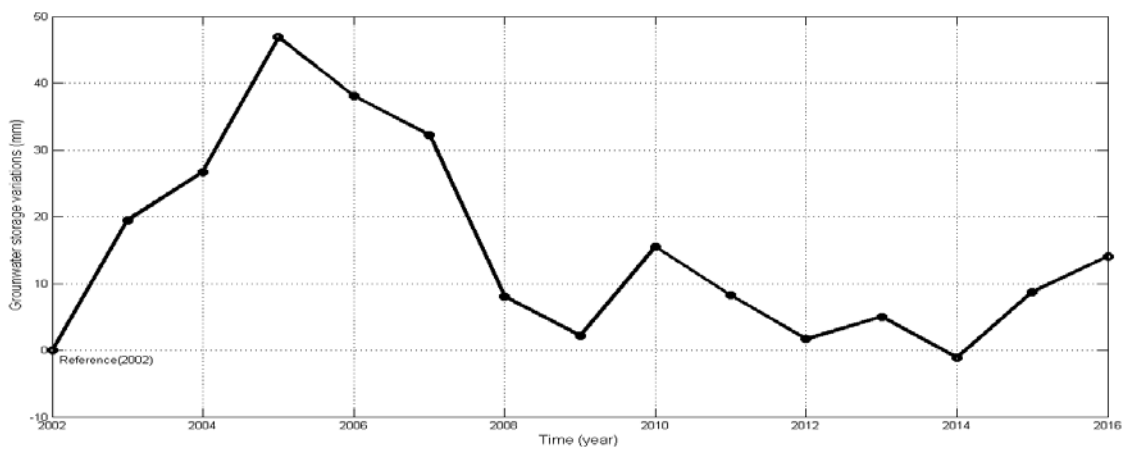
نمایش داده شده‌اند.



شکل ۴-۱۰: سری زمانی تغییرات آب‌های زیرزمینی با انتخاب سال ۲۰۰۲ به‌عنوان مرجع- فیلتر



شکل ۴-۱۱: سری زمانی تغییرات آب‌های زیرزمینی با انتخاب سال ۲۰۰۲ به‌عنوان مرجع- موجک Db4

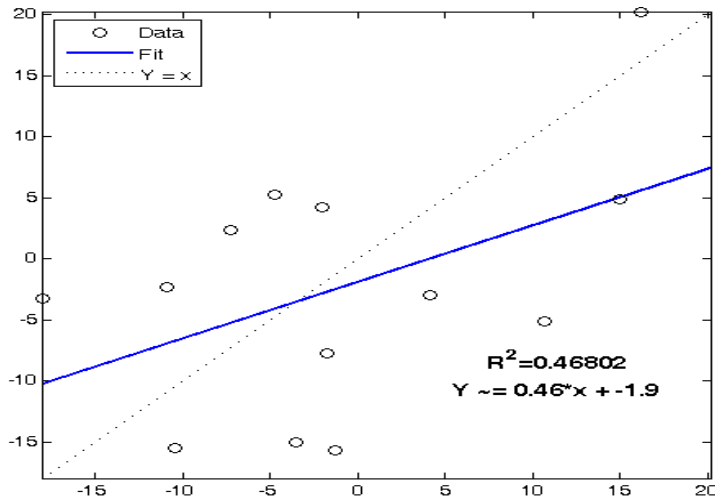


شکل ۴-۱۲: سری زمانی تغییرات آب‌های زیرزمینی با انتخاب سال ۲۰۰۲ به‌عنوان سال مرجع- موجک CUP

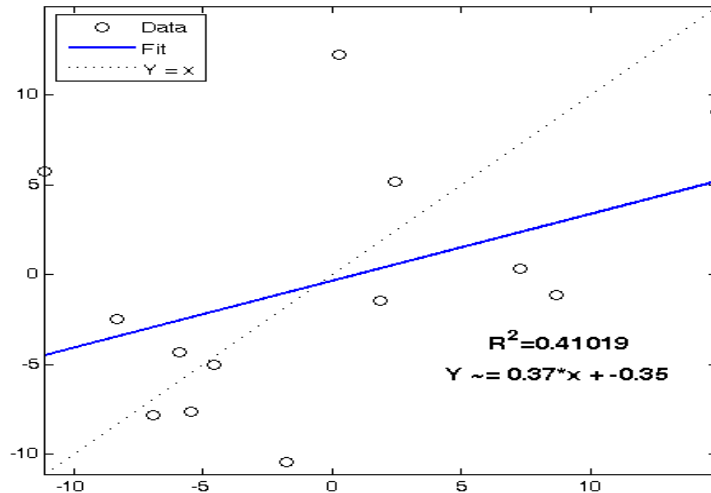
برای نمونه همان‌طور که از شکل ۴-۴۹ مشخص است، سطح آب‌های زیرزمینی به‌طور میانگین از سال ۲۰۰۲ تا سال ۲۰۱۶ میلادی روندی کاهشی دارد و بیشترین مقدار افزایش تغییرات آب‌زیرزمینی در سال ۲۰۰۵ میلادی به‌میزان تقریبی ۳۱ میلی‌متر اتفاق افتاده است.

۴-۵- صحت‌سنجی نتایج

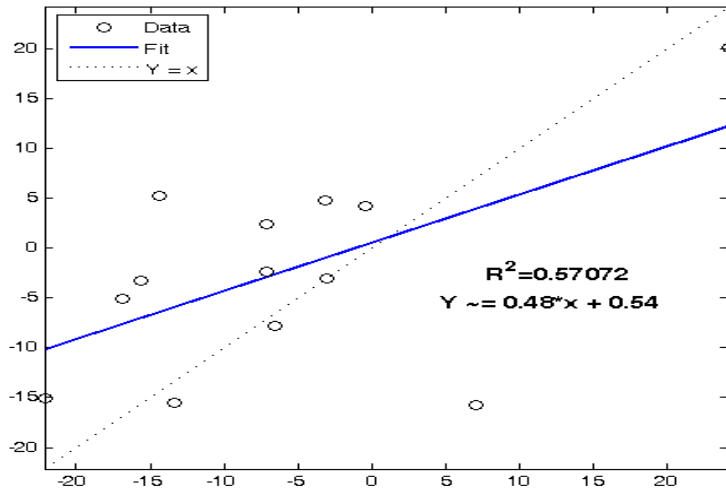
در این قسمت میزان دقت نتایج تلفیق‌شده‌ی داده‌های ماهواره‌ی ثقل‌سنجی GRACE و مدل هیدرولوژی GLDAS ارائه شده است. از دیرباز بررسی سطح سفره‌های آب‌زیرزمینی و آگاهی از روند تغییرات آن توسط احداث چاه‌های پیژومتری در مقیاس‌های نقطه‌ای و محلی صورت می‌گیرد. این تغییرات به دلایل مختلفی از جمله عدم حفر چاه‌های پیژومتری در مناطق کوهستانی و صعب‌العبور، نبود چاه‌های پیژومتری در مناطق کویری که بخش زیادی از کشور ایران را شامل می‌شود، در دسترس نبودن اطلاعات دقیق از سال‌های دور و خطای ایجادشده توسط عامل انسانی و سایر عوامل باعث شده است که اندازه‌گیری تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی بوسیله‌ی روش‌های سنتی به‌صورت دقیق امکان‌پذیر نباشد و توانایی ارزیابی مناسب و کارآمد نتایج مدل توسط داده‌های مشاهداتی با خطاهایی همراه باشد. ولی از طرفی بنا به وسعت زیاد منطقه‌ی مطالعاتی و عدم وجود نتایج مدل‌های دیگر هیدرولوژیکی، چاره‌ای جز مقایسه نتایج مدل با داده‌های ثبت‌شده مشاهداتی وجود ندارد. از این رو نتایج مدل با استفاده از مشاهدات چاه‌های پیژومتری در دو استان خراسان رضوی و خراسان جنوبی مورد صحت‌سنجی قرار گرفتند، که نتایج به‌صورت زیر نشان داده می‌شوند.



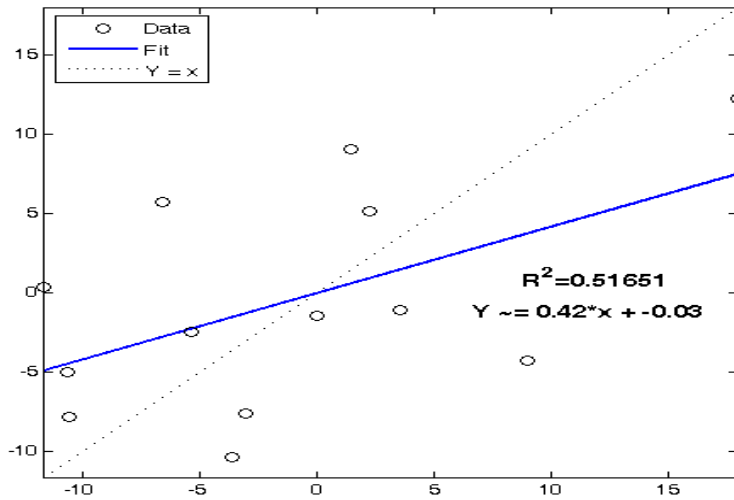
شکل ۴-۱۳: مدل رگرسیون برای استان خراسان رضوی- با استفاده از فیلتر



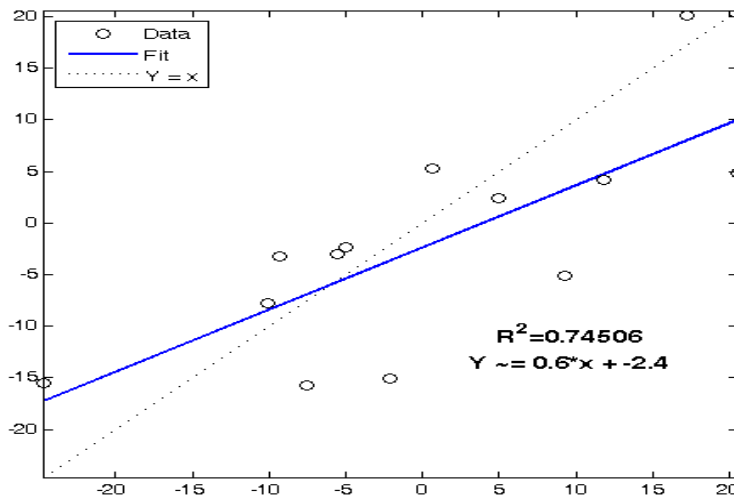
شکل ۴-۱۴: مدل رگرسیون برای استان خراسان جنوبی- با استفاده از فیلتر



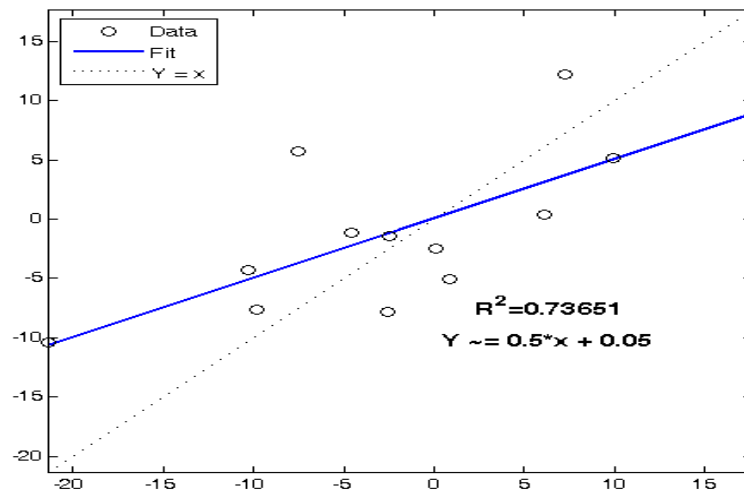
شکل ۴-۱۵: مدل رگرسیون برای استان خراسان رضوی- با استفاده از موجک Db4



شکل ۴-۱۶: مدل رگرسیون برای استان خراسان جنوبی - با استفاده از موجک Db4

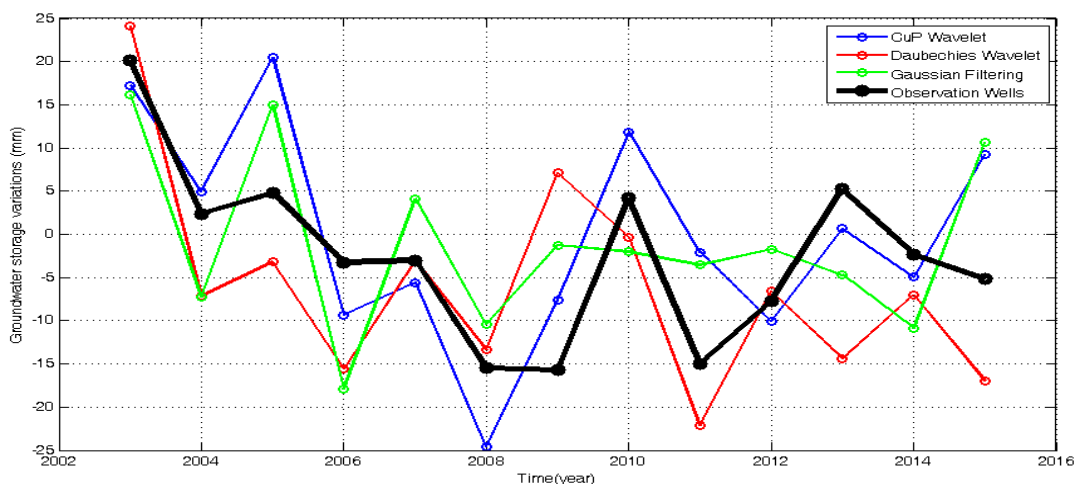


شکل ۴-۱۷: مدل رگرسیون برای استان خراسان رضوی - با استفاده از موجک CUP

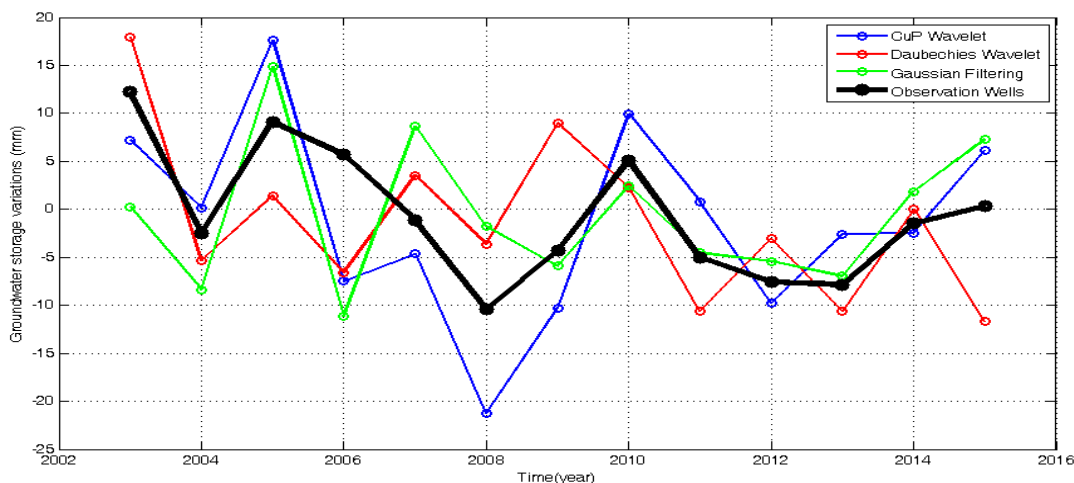


شکل ۴-۱۸: مدل رگرسیون برای استان خراسان جنوبی - با استفاده از موجک CUP

همان‌طور که از شکل‌های بالا مشخص است، ضریب R^2 در دو موجک CUP و Db4 نتایج بهتری را نسبت به فیلتر گوسین نشان می‌دهد و در بین موجک‌ها، موجک CUP سازگاری بیشتری را با داده‌های چاه‌های پیزومتری دارد. در نتیجه می‌توان به این نکته پی برد که موجک‌ها نسبت به فیلتر گوسین سازگاری بهتری در محلی‌سازی سیگنال‌های ماهواره‌ی GRACE دارند. در تحقیقات مشابه‌ای که برای تعیین پارامترهای گسل زلزله از ترکیب موجک CUP و فیلتر گوسین بر روی داده‌های ماهواره‌ی GRACE استفاده شده‌بود، موجک CUP به نتایج دقیق‌تری منجر شد [۶۲].



شکل ۴-۱۹: مقایسه موجک CUP، Db4 و فیلتر گوسین با چاه‌های پیزومتری به صورت سری زمانی برای خراسان رضوی



شکل ۴-۲۰: مقایسه موجک CUP، Db4 و فیلتر گوسین با چاه‌های پیزومتری به صورت سری زمانی برای خراسان جنوبی

۵- فصل پنجم

جمع‌بندی و پیشنهادات

۵-۱- جمع‌بندی

در این پژوهش با استفاده از مشاهدات ماهواره‌های ثقل‌سنجی GRACE و به کمک سه خروجی مدل GLDAS، یعنی آب معادل برف، رطوبت خاک و آب ذخیره‌شده در تاج پوشش گیاهان در یک دوره‌ی زمانی ۱۴ ساله یعنی از آگوست سال ۲۰۰۲ میلادی تا آگوست سال ۲۰۱۶ میلادی، تغییرات ضخامت لایه‌ی آب زیرزمینی در کشور ایران محاسبه شده‌است. یکسان بودن مسیر پرواز ماهواره‌های ثقل‌سنجی GRACE در جهت شمال-جنوب باعث انباشتگی داده و ایجاد نوارهایی در این راستا می‌شود. در این تحقیق، برای حذف خطای نواری مشاهدات ماهواره‌های ثقل‌سنجی GRACE، از فیلتر گوسین با شعاع میانگین‌گیری ۳۵۰ کیلومتر و همچنین روش موجک بر روی سیگنال‌های جاذبه‌ی بدست آمده از مشاهدات این ماهواره استفاده شده‌است. در آخر مجموع مشاهدات حاصل از ماهواره‌ی ثقل‌سنجی GRACE و مدل هیدرولوژی GLDAS، با چاه‌های پیزومتری در دو استان خراسان رضوی و خراسان جنوبی مورد صحت‌سنجی قرار گرفته‌اند. که نتایج بدست‌آمده به شرح زیر می‌باشد:

۱- روش آنالیز موجک روشی مناسب برای محلی‌سازی سیگنال‌های ماهواره‌ی GRACE می‌باشد و تابع مقیاس چند جمله‌ای مکعبی و موجک مرتبط با آن، به‌جای فیلتر برای مشاهدات ماهواره‌ی ثقل‌سنجی GRACE پیشنهاد می‌شود.

۲- فیلتر گوسین با شعاع میانگین‌گیری ۳۵۰ کیلومتر، نتایج خوبی را در جهت از بین‌بردن خطای ضرایب با درجه و مرتبه بالا در داده‌های ماهواره‌ی GRACE، ارائه کرده‌است و برای حذف خطای نواری از داده‌های این ماهواره مناسب بوده‌است، ولی استفاده از روش موجک و بخصوص موجک CUP نتایج بهتری را در برآورد تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی ایجاد کرده‌است.

۳- شکل‌های حاصل از این تحقیق، نشان‌دهنده‌ی این مطلب است که ماکزیمم افزایش سطح آب‌زیرزمینی به میزان ۱۶ میلی‌متر در سال ۲۰۰۳ و کم‌ترین میزان آن به مقدار ۱۸- میلی‌متر در سال

۲۰۰۸ به کمک فیلتر گوسین است. همچنین بیشترین مقدار افزایش سطح آب‌زیرزمینی به کمک موجک Db4 در سال ۲۰۰۳ به میزان ۱۷ میلی‌متر و کم‌ترین میزان آن به مقدار تقریبی ۲۰- میلی‌متر در سال ۲۰۱۱ صورت گرفته‌است و بیشترین تغییرات آب‌زیرزمینی روی کشور ایران در سال ۲۰۰۳ و ۲۰۰۵ به میزان تقریبی ۲۰ میلی‌متر و کم‌ترین تغییرات آن در سال ۲۰۰۸ به مقدار تقریبی ۲۵- میلی‌متر بدست آمده‌است.

۵-۲- پیشنهادات برای کارهای آتی

همان‌طور که از نتایج این تحقیق پیداست، منابع آب‌های زیرزمینی در سراسر کشور روندی کاهشی دارند و باید با رویکردی مناسب و ارائه‌ی روش‌هایی در جهت انطباق شرایط استفاده از منابع آبی و بخصوص منابع آب‌های زیرزمینی با وضعیت اقلیمی کشور اقدام شود.

در مطالعه‌ی تغییرات منابع آب‌های زیرزمینی در کشور ایران، می‌توان علاوه بر سه خروجی تغییرات آب معادل برف (SWE)، تغییرات رطوبت خاک (SM) و تغییرات کل آب موجود در تاج پوشش گیاهان (TCW)، از پارامترهای دیگر مدل جهانی هیدرولوژی GLDAS در کنار پارامترهای قبلی استفاده کرد. همچنین می‌توان از سایر مدل‌های هیدرولوژیکی نظیر مرکز پیش‌بینی اقلیم (CPC)^۱، در استخراج پارامتر هیدرولوژیکی تغییرات رطوبت خاک (SM)، در کشور ایران برای ارزیابی هرچه دقیق‌تر نتایج استفاده کرد.

باتوجه به سازگاری مناسب داده‌های ماهواره‌ی GRACE با بسیاری از مدل‌های هیدرولوژیکی از جمله مدل GLDAS، می‌توان از داده‌های این ماهواره برای کالیبره‌کردن نتایج سایر مدل‌های هیدرولوژیکی استفاده کرد.

باتوجه به اینکه سازمان ملی هوانوردی و فضایی آمریکا (NASA) در ادامه‌ی پروژه‌ی زوج

¹ Climate Prediction Center

ماهواره‌ی GRACE، ماهواره‌ی دیگری با عنوان GRACE-FO¹ را برای ادامه‌ی مأموریت قبلی در اواخر سال ۲۰۱۷ میلادی، به فضا پرتاب خواهد کرد، لذا نتایج این تحقیق می‌تواند برای کارهای آتی و بازه‌ی زمانی طولانی‌تر مفید باشد.

در کنار مدل تلفیقی ماهواره‌ی GRACE و مدل هیدرولوژی GLDAS، می‌توان از سناریوهای مختلف تغییر اقلیم در منطقه‌ی مورد نظر مطالعه بهره‌برد.

همچنین می‌توان از سایر روش‌های محلی‌سازی نظیر تابع اسلپین^۲ و توابع پایه‌ی شعاعی کروی (SRBF)^۳ مانند کرنل دو قطبی شعاعی، استفاده کرد و نتایج حاصل از این روش‌ها را با نتایج این پژوهش مقایسه کرد.

¹ Gravity Recovery And Climate Experiment Follow-On

² Slepian

³ Spherical Radial Basis Function

٦- فصل ششم

مراجع

[۱] سیار ایرانی، کریم. (۱۳۸۳)، "ضرورت اهمیت بهینه‌سازی مصرف آب کشاورزی و تغییر مدیریت تقسیم و توزیع آب از دولتی به خصوصی"، اولین همایش بررسی مشکلات شبکه‌های آبیاری، زهکشی و مصرف بهینه کشاورزی، تهران.

[۲] کفیل، محبوبه؛ ضیا تبار احمدی، میرخالق. (۱۳۸۵)، "مقایسه دو روش شبکه عصبی مصنوعی و سری زمانی در پیش‌بینی میزان جریان رودخانه"، دومین کنفرانس مدیریت منابع آب، دانشگاه صنعتی اصفهان، انجمن علوم و مهندسی منابع آب ایران، اصفهان.

[۳] ذکی، یاشار؛ احتشامی، محمدرضا. (۱۳۹۳)، "بررسی و تحلیل مسائل متقابل سیاست و آب (هیدروپلیتیک) در قرن ۲۱"، همایش ملی آب، انسان و زمین، اصفهان.

[۴] پیشگاهی‌فرد، زهرا؛ جاجرمی، کاظم، مهکویی، حجت. (۱۳۹۳)، "تهدیدات زیست محیطی در کشورهای منطقه‌ی ژئوپلیتیکی خلیج فارس با تأکید بر بحران منابع آب"، فصل‌نامه برنامه‌ریزی منطقه‌ای، سال چهارم، شماره ۱۳، ص ۱۴۳-۱۳۳.

[۵] شریفی، محمدعلی؛ آخوندزاده، مهدی، شهریسوند، محسن و صنعتگر قوچانی، مسعود. (۱۳۹۳)، "استفاده از داده‌های ماهواره‌های ثقل سنجی به منظور پایش خشکسالی"، پنجمین کنفرانس بین‌المللی مدیریت جامع بحران‌های طبیعی، ص ۴۵۱-۴۵۷، تهران.

[6] Lanen, V., H.A.J., Peters, E. (2000), "effects and assessment of groundwater droughts", In: Vogt, J.V., Somma, F. (Eds.), Drought and Drought Mitigation in Europe. Kluwer, Dordrecht, 49-61.

[7] Joodaki, G. (2014), PhD. thesis, "Earth Mass Change Tracking Using GRACE Satellite Gravity Data", Department of Civil and Transport Engineering, Norwegian University of Science and Technology.

[8] Joodaki, G., Wahr, J., and Swenson, S. (2013), "Estimating the Human Contribution to Groundwater Depletion in the Middle East, from GRACE Data, Land Surface Models, and Well Observations", Water Research, under review.

[9] Shiati, K. (1999), "World Water Vision for Food: Country Case Study Iran", Paper presented at the MENA Consultation Meeting, Bari, Italy.

[10] Rahnama, M., and Shakibae, A. (2005), "Modeling of the Earth Summit in the drop in groundwater level (Case Study of Rafsanjan plain)", In: Fifth the Iranian Hydraulic Conference. (In Persian).

[11] Ganji Khorramdel, N., Mohammadi, K., and Monem, M.J. (2008), "Optimization of observation well network for the estimation of groundwater balance using double water table fluctuation method. J. Water Soil", 22: 2. 358-370. (In Persian).

[۱۲] یوسفی‌راد، مصطفی؛ صفایی‌جزی، رامین، بخشایی، مهسا. (۱۳۸۷)، "محاسبه‌ی حجم آبخوان‌های آبرفتی (سفره‌های آب‌زیرزمینی) در سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) مطالعه موردی: دشت کمیجان اراک"، همایش ژئوماتیک، تهران.

[۱۳] مقاله "آشنایی با منابع آب زیرزمینی"، اندیشکده تدبیر آب ایران، ۱۳۹۲.

[۱۴] دل‌آرام، امیر؛ نجفی‌علمداری، مهدی؛ نعیمی، مجید. (۱۳۸۶)، "بررسی توانایی داده‌های ماهواره‌ای GRACE در تعیین تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی ایران"، همایش ژئوماتیک، تهران.

[۱۵] ایزدی، عزیز ا...؛ داوری، کامران، علیزاده، امین و قهرمان، بیژن. (۱۳۸۷)، "کاربرد مدل داده‌های ترکیبی در پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی"، مجله آبیاری و زهکشی ایران، جلد ۲، شماره ۲، ص ۱۳۴-۱۴۴، مشهد.

[۱۶] تجلی‌زاده‌خوب ب، (۱۳۸۷)، پایان‌نامه ارشد: "پیش‌بینی نوسانات سطح ایستابی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی مطالعه موردی دشت فیروزآباد فارس"، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز.

- [17] Madani, K., Aghakouchak, A., Mirchi, A. (2016), "Iran's Socioeconomic Drought: Challenges of a Water Bankrupt Nation, Iranian Studies", 49:6, 997-1016.
- [18] Rodell, M., Chen, J.L., Hiroko, K., Famiglietti, J., Nigro, J., Wilson, C. (2006), "Estimating groundwater storage changes in the Mississippi River basin (USA) using GRACE", Hydrogeology Journal.
- [19] Tapley, B.D, Bettadpur, S., Ries, J., Thompson, P., Watkins, M. (2004), "GRACE Measurements of Mass Variability in the Earth System", Science, Vol 305.
- [20] Wahr, J., Swenson, S., Zlotnicki, V., Velicogna, I. (2004), "Time-variable gravity from GRACE: First results", Geophysical Research Letters, VOL. 31, L11501, DOI: 10.1029/2004GL019779.
- [21] Andersen, O., Seneviratne, S., Hinderer, J., Viterbo, P. (2005), "GRACE-derived terrestrial water storage depletion associated with the 2003 European heat wave", Geophysical Research Letters, VOL. 32, L18405, DOI: 10.1029/2005GL023574.
- [22] Awange, J., Sharifi, M., Keller, W., Kuhn, M. (2008), "GRACE Application to the Receding Lake Victoria Water Level and Australian Drought", in book: Observing our Changing Earth, pp. 387-396.
- [23] Strassberg, G., Scanlon, B., Chambers, D. (2009), "Evaluation of groundwater storage monitoring with the GRACE satellite: Case study of the High Plains aquifer, central United States", Water Resources Research, VOL. 45, W05410, DOI: 10.1029/2008WR006892.
- [24] Longuevergne, L., Scanlon, B., Wilson, C. (2010), "GRACE Hydrological estimates for small basins: Evaluating processing approaches on the High Plains aquifer, USA", Water Resources Research, VOL. 46, W11517, DOI: 10.1029/2009WR008564.
- [25] Moiwo, J., Tao, F., Lu, W. (2012), "Analysis of satellite-based and in situ hydro-climatic data depicts water storage depletion in North China Region", Hydrological Processes, VOL. 27, DOI: 10.1002/hyp.9276.
- [26] Ferreira, V., Gong, Z., He, X., Zhang, Y. (2013), "Estimating Total Discharge in the

Yangtze River Basin Using Satellite-Based Observations", *Remote Sensing*, 5, 3415-3430, DOI: 10.3390/rs5073415.

[27] Lee, S., Seo, J., Lee, SK. (2014), "Validation of terrestrial water storage change estimates using hydrologic simulation", *Journal of Water Resources and Ocean Science*, 3(1), 5-9, DOI: 10.11648/j.wros.20140301.12.

[28] Chen, Q., Shen, Y., Chen, W., Zhang, X., Hsu, H. (2016), "An improved GRACE monthly gravity field solution by modeling the non-conservative acceleration and attitude observation errors", *Journal of Geodesy*, VOL. 90, pp. 503-523.

[29] Xiang, L., Wang, H., Steffen, H., Wu, P., Jia, L. (2016), "Groundwater storage changes in the Tibetan Plateau and adjacent areas revealed from GRACE satellite gravity data", *Earth and Planetary Science Letters* 449, 228-239.

[۳۰] آل محمد ح، (۱۳۸۸)، پایان‌نامه ارشد: "بررسی اثر میزان ذخایر زمینی آب در تغییرات تراز پهنه‌های آبی (مطالعه موردی حوضه آبریز دریاچه خزر با اصلاح مدل ریاضی موجود)"، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف.

[۳۱] نجفی علمداری، مهدی؛ شریفی، محمدعلی، مختاری، الهه. (۱۳۸۹)، "کاربرد داده‌های GRACE در تعیین سطح آب‌های قاره‌ای محدوده مطالعاتی ایران"، نخستین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی منابع آب ایران، کرمانشاه.

[۳۲] کمیلیان پ، (۱۳۹۱)، پایان‌نامه ارشد: "بررسی نوسانات حجم ذخایر زمینی آب از مشاهدات ماهواره GRACE"، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف.

[۳۳] شریفی، محمدعلی؛ آخوندزاده، مهدی، شهریسوند، محسن و صنعتگر قوچانی، مسعود. (۱۳۹۳)، "پایش خشکسالی در ایران با استفاده از داده‌های ماهواره‌ی ثقل‌سنجی GRACE و مدل هیدرولوژی GLDAS"، شانزدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، ص ۳۵-۳۹، تهران.

[۳۴] فرخ‌نیا، اشکان؛ مرید، سعید. (۱۳۹۳)، "بررسی قابلیت داده‌های ماهواره بازیابی گرانش و آزمایش اقلیمی و خروجی مدل‌های سیستم جهانی تلفیق اطلاعات زمینی برای برآورد بیلان آب در مقیاس‌های مکانی بزرگ (مطالعه موردی حوضه آبریز دریاچه ارومیه)"، "تحقیقات منابع آب ایران"، شماره ۱، دوره ۱۰: ص ۵۱-۶۲.

[۳۵] اشرف‌زاده افشارع، (۱۳۹۴)، پایان‌نامه ارشد: "ارزیابی منابع آب‌های زیرزمینی جنوب ایران با استفاده از مشاهدات ماهواره‌های ثقل‌سنجی GRACE و چاه‌های آب‌زیرزمینی"، دانشکده نقشه‌برداری، دانشگاه زنجان.

[۳۶] فرجی، زهره؛ کاویانی، عباس، اشرف‌زاده، افشین. (۱۳۹۶)، "ارزیابی داده‌های ماهواره‌ی GRACE در برآورد تغییرات سطح آب‌زیرزمینی در استان قزوین"، "مجله اکوهیدرولوژی"، شماره ۲، دوره ۴: ص ۴۶۳-۴۷۶.

[۳۷] غلامیان، فرزاد؛ موسوی، زهرا. (۱۳۹۵)، "ارزیابی نرخ کاهش آب‌زیرزمینی و فرونشست سطح زمین با استفاده از داده‌های ماهواره GRACE و تداخل‌سنجی راداری (دشت قزوین)"، هفدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، تهران.

[38] Wahr, J. (2006), "Time-variable Gravity from Satellite", Department of Physics and Cooperative Institute for Research in Environmental Science, Boulder: University of Colorado.

[۳۹] حسینی، سیدمحمد؛ زمزم، داوود. (۱۳۹۴)، "محاسبه میزان تغییرات ثقل بر روی سطح زمین با استفاده از ماهواره گوس"، "نشریه علمی-ترویجی مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی"، شماره ۴، دوره ۶.

[۴۰] صفری، عبدالرضا؛ شریفی، محمدعلی، امجدی‌پرور، بابک. (۱۳۸۸)، "انتقال به سمت پایین مشاهدات ماهواره‌ی CHAMP با استفاده از انتگرال آبل-پواسن جهت بازسازی میدان ثقل‌زمین در مقیاس جهانی"، هشتمین همایش انجمن هوافضای ایران، اصفهان.

[41] Tapley, B.D., Bettadpur, S., Watkins, M., Reigber, C. (2004), "The Gravity Recovery and Climate Experiment: Mission overview and early results", *Geophysical Research Letters*, 31, L09607.

[۴۲] هاشمی‌فراهانی، حسن؛ آزموده‌اردلان، علیرضا. (۱۳۸۸)، "برآورد کمترین مربعات بایاس داده‌های واقعی فاصله‌یابی بین زوج ماهواره‌ی GRACE و تولید نسخه‌ی جدیدی برای فایل‌های KBRL1B-X براساس مشاهدات GPS"، *مجله فیزیک زمین و فضا*، شماره ۲، دوره ۳۵: ص ۶۱-۷۷.

[۴۳] صفری، عبدالرضا؛ شریفی، محمدعلی، امجدی‌پرور، بابک. (۱۳۹۰)، "استفاده از الگوریتم MSAA در حل دستگاه معادلات مربوط به بازیابی میدان جاذبه‌ی زمین در مقیاس جهانی تا درجه و مرتبه ۱۲۰ با استفاده از مشاهدات ماهواره‌ی GRACE"، *مجله فیزیک زمین و فضا*، شماره ۱، دوره ۳۷: ص ۳۳-۴۹.

[44] URL: <http://EarthObservatory.nasa.gov/Features/GRACE/>

[۴۵] شریفی، محمدعلی؛ صفری، عبدالرضا، قبادی‌فر، خسرو. (۱۳۹۱)، "اهداف و دستاوردهای مأموریت‌های اختصاصی ثقل‌سنجی CHAMP، GRACE و GOCE"، *نشریه علمی-ترویجی مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی*، شماره ۳، دوره ۳.

[46] Rummel, R., Balmino, G., Johannessen, J., Visser, P., Woodworth, P. (2002), "Dedicated gravity field missions-principles and aims", *Journal of Geodynamics*, VOL. 33, pp. 3-20.

[۴۷] آزموده‌اردلان، علیرضا؛ هاشمی‌فراهانی، حسن. (۱۳۸۶)، "تجزیه و تحلیل حساسیت داده‌های جاذبی

برای ماهواره‌ی گرانی‌سنجی GRACE-1، "مجله فیزیک زمین و فضا، شماره ۳، دوره ۳۳: ص ۱۹-۳۳.

[۴۸] فتح‌الله‌زاده، فرزام؛ وثوقی، بهزاد، رئوفیان‌نائینی، مهدی. (۱۳۹۳)، "کاربرد تنسور گرادیان جاذبه در حذف خطای نواری مشاهدات ثقل‌سنجی ماهواره‌ای گریس (مطالعه خاص: زلزله ۹/۲ ریشتری سوماترا-دسامبر ۲۰۰۴)"، نشریه علمی-پژوهشی علوم و فنون نقشه‌برداری، شماره ۴، دوره ۳.

[49] URL: <http://geoid.colorado.edu/grace/dataportal.html>

[۵۰] محمدیوسفی بهلولی احمدی، محبوبه؛ صفری، عبدالرضا، شهبازی، آناهیتا. (۱۳۹۵)، "بررسی عملکرد انواع مختلف توابع پایه‌ی شعاعی کروی در مدلسازی محلی میدان گرانی زمین"، فصلنامه علمی-پژوهشی اطلاعات جغرافیایی، شماره ۱۰۰، دوره ۲۵: ص ۶۱-۷۲.

[۵۱] شریفی، محمدعلی؛ صفری، عبدالرضا، امجدی‌پرور، بابک. (۱۳۹۱)، "مقایسه روش انتگرال انرژی و روش شتاب در بازیابی میدان جاذبه زمین"، مجله فیزیک زمین و فضا، شماره ۱، دوره ۳۸: ص ۵۱-۶۸.

[۵۲] اشرف‌زاده افشار، علی؛ جودکی، غلامرضا. (۱۳۹۴)، "بررسی و ارزیابی ضریب پهن‌شدگی قطبین در مدل‌های ماهیانه‌ی ماهواره‌ی ثقل‌سنجی GRACE جهت برآورد ذخایر آب‌های زیرزمینی"، دومین کنگره ملی آبیاری و زهکشی ایران، اصفهان.

[۵۳] شهریسوند م، (۱۳۹۳)، پایان‌نامه ارشد: "بررسی تغییرات میدان ثقل مرتبط با وقوع زلزله‌های بزرگ با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای"، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه تهران.

[۵۴] فتح‌الله‌زاده، فرزام؛ وثوقی، بهزاد، رئوفیان‌نائینی، مهدی، محبی، محمود، جوادی‌آذر، رحیم. (۱۳۹۵)، "تعیین تصحیحات ناشی از اثرات هیدرولوژی و اقیانوسی در مطالعه تغییرات میدان ثقل زمین"، نشریه علمی-پژوهشی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی، شماره ۲، دوره ۴: ص ۱۳-۲۸.

[۵۵] مختاری، ا. (۱۳۸۹)، پایان‌نامه ارشد: "پردازش داده‌های پتانسیلی ماهیانه ماهواره‌های GRACE جهت تعیین تغییرات پارامترهای میدان ثقل زمینی"، دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

[56] Wahr, J., Molenaar, M., Bryan, F. (1998), "Time variability of the Earth's gravity field: Hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE", Journal of Geophysical Research, VOL. 103, pp. 30,205-30,229.

[۵۷] صفری، عبدالرضا؛ شریفی، محمدعلی، باقری، حمیدرضا، توکلی، یحیی‌الله. (۱۳۹۲)، "پالایش داده‌های پتانسیلی GRACE برای تعیین تغییرات میدان گرانی با استفاده از روش پایدارسازی تیخونوف تعمیم‌یافته در زیرفضای سوبولف"، **مجله فیزیک زمین و فضا**، شماره ۲، دوره ۳۹: ص ۵۱-۷۷.

[58] Sharifi, M. (2004), PhD. thesis, "Satellite Gradiometry Using a Satellite Pair", Department of Geodesy and GeoInformatics, University of Stuttgart.

[59] Jekeli, C. (1981), "Alternative Methods to Smooth the Earth's Gravity Field", Department of Geodetic Science and Surveying, University of Ohio.

[۶۰] نعیمی، مجید؛ نجفی‌علمداری، مهدی، دل‌آرام، امیر. (۱۳۸۶)، "تعیین تغییرات زمانی میدان ثقل زمین با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای GRACE"، همایش ژئوماتیک، تهران.

[۶۱] فتحی ب. (۱۳۹۱)، پایان‌نامه ارشد: "پیش‌بینی نوسانات سطح آب زیرزمینی با استفاده از مدل‌های تلفیقی شبکه‌ی عصبی- فازی، تطبیقی- موجکی (WNF) و شبکه‌ی عصبی- موجکی (WNN) و مدل خطی (ARIMA) مطالعه موردی: دشت قم"، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف.

[۶۲] فتح‌الله‌زاده، فرزاد؛ وثوقی، بهزاد، رئوفیان‌نائینی، مهدی. (۱۳۹۵)، "تعیین پارامترهای گسل مسبب زلزله ۸/۸ ریشتر شیلی با آنالیز موجک مشاهدات ثقل‌سنجی ماهواره‌ای گریس"، **نشریه علمی-ترویجی**

مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، شماره ۰، دوره ۰: ص ۱-۷.

[۶۳] فتح‌الله‌زاده، فرزام؛ رئوفیان‌نائینی، مهدی، وثوقی، بهزاد، محبی، محمود، جوادی‌آذر، رحیم. (۱۳۹۵)،

"محل‌سازی سیگنال‌های جاذبه‌ی ناشی از ماهواره‌ی ثقل‌سنجی گریس"، نشریه علمی-پژوهشی

مهندسی فناوری اطلاعات مکانی، شماره ۴، دوره ۴: ص ۶۹-۸۱.

[64] Freeden, W., Gervens, T., Schreiner, M. (1998), "Constructive Approximation on the Sphere (With Applications to Geomathematics)", Oxford Sci Publ, Clarendon.

[۶۵] فتح‌الله‌زاده، فرزام؛ وثوقی، بهزاد، رئوفیان‌نائینی، مهدی، محبی، محمود. (۱۳۹۵)، "برآورد تغییرات

سالیانه آب‌های زیرزمینی در ایران به کمک مشاهدات ماهواره ثقل‌سنجی گریس"، اولین کنفرانس

مهندسی فناوری اطلاعات مکانی، تهران.

[66] Jin, S., Feng, G. (2013), "Large-scale variations of global groundwater from satellite gravimetry and hydrological models, 2002-2012", Global and Planetary Change, VOL. 106, pp. 20-30.

[67] Montecino, H., Staub, G., Ferreira, V., Parra, L. (2016), "Monitoring GroundWater Storage in Northern Chile Based on Satellite Observations and Data simulation", Boletim de Ciências Geodésicas, VOL. 22, pp. 1-15.

Abstract

By comparing countries in temperate regions with Iran that has dry and semi-arid climatic conditions, water scarcity is one of the most important deterrent factors in the development of the country. As a result, Proper utilization of existing water resources especially groundwater resources has always been one of the most important and reliable water sources in arid and semi-arid regions and the extraction of water from these areas than the other climates is of particular importance. The purpose of this thesis, Estimated annual changes in groundwaters level in Iran by using GRACE satellite datas and three outputs of the GLDAS model are Snow Water Equivalent, Soil Moisture and Total Canopy Water Storage, During August 2002 to August 2016. To eliminate the existing error in GRACE satellite datas, The Wavelet and Gaussian filter methods was used. And finally, Validation of groundwater level changes was done by observation wells datas at the provinces of Razavi Khorasan, and South Khorasan. The results of the decline in groundwaters level in the country during 2002 to 2016 and also better precision of Wavelet method compared to Gaussian filter showed.

Keywords: GRACE gravity satellite, GLDAS hydrology model, GroundWaters, Wavelet method, Gaussian filter



Shahrood University of Technology
Faculty of Civil Engineering

MSc Thesis in Water Resources Engineering and Management

**Using Wavelet and Gaussian filter method to Estimate annual
variations of GroundWaters in Iran using GRACE gravity
satellites**

By: Amin Kazemi

Supervisor:
Dr Saeed Golian

October 2017